

---

# Bachelorarbeit

---

Herr  
**Lukas Marx**

**Nutzbare Inhaltsstoffe in hö-  
heren Wasserpflanzen unter  
besonderer Berücksichtigung  
der Gattungen *Elodea* und  
*Myriophyllum***

Mittweida, 2016



Fakultät Angewandte Computer- und Biowissen-  
schaften

---

## **Bachelorarbeit**

---

# **Nutzbare Inhaltsstoffe in höheren Wasserpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Gattungen *Elodea* und *Myriophyllum***

Autor:  
**Herr**

**Lukas Marx**

Studiengang:  
**Biotechnologie und Bioinformatik**

Seminargruppe:  
**BI13w1-B**

Erstprüfer:  
**Frau Prof. Dr. Petra Radehaus**

Zweitprüfer:  
**Herr Prof. Dr. Andreas Zehnsdorf**

Einreichung:  
**Mittweida, 24. August 2016**

Verteidigung/Bewertung:  
**Mittweida, 2016**

### **Bibliographische Beschreibung:**

Marx, Lukas: Nutzbare Inhaltsstoffe in höheren Wasserpflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Gattungen *Elodea* und *Myriophyllum*. - 2016. - 6, 61, 7 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften, Bachelorarbeit, 2016

### **Englischer Titel**

Useful ingredients in higher water plants with special consideration of the genera *Elodea* and *Myriophyllum*

### **Kurzbeschreibung:**

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die Analyse der organischen und anorganischen Inhaltsstoffe der höheren Wasserpflanzen *Elodea nuttallii* und *Myriophyllum heterophyllum*. Dazu wurden mithilfe von Atomspektrometrie und Gaschromatographie mit Massensektrometer-Kopplung Analysen durchgeführt. Es konnten interessante und für eine weitere Verwendung der Biomasse wertvolle Inhaltsstoffe identifiziert werden. Vor allem Linolsäure und  $\alpha$ -Linolensäure für eine ernährungsphysiologische Verwendung, als auch  $\beta$ -sitosterol für pharmazeutische Zwecke konnten nachgewiesen werden.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bedanken, bei all den Personen, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein Dank gilt besonders Frau Prof. Dr. Petra Radehaus, die mich während der Arbeit betreut hat und mir stets bei Fragen und Problemen zur Seite stand.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Zehnsdorf bedanken, der mir die Bearbeitung dieses Themas ermöglicht hat. Ich danke Ihnen auch für die freundliche und konstruktive Unterstützung, sowie viele hilfreichen Anregungen während der gesamten Bearbeitungszeit.

Ein großer Dank gilt ebenfalls Dr. rer. nat. habil Jürgen Pörschmann vom Department Technische Umweltchemie, sowie Dr. Hans-Joachim Stärk vom Department Analytik des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig. Beide haben mir mit Ihren Analysen große Unterstützung zukommen lassen und mir ermöglicht, diese Arbeit zu verfassen.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Department Umwelt- und Biotechnologisches Zentrum des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig bedanken, die mir die notwendigen Mittel zur Verfügung stellten und stets tatkräftig zur Hilfe standen. Ich bedanke mich für das herausragende, freundliche und konstruktive Arbeitsklima.

Ein letzter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern. Ohne ihre Unterstützung wäre es mir nicht möglich gewesen, dieses Studium zu beenden. Ich bedanke mich für ihre Hilfe in jeglicher Form und ihre Unterstützung während meines gesamten Studiums

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeine Informationen.....	1
1.2 Definition des Begriffs „Neophyt“ .....	5
1.3 Definition des Begriffs „invasiv“ .....	8
1.4 Wissens- und Forschungsstand zu aquatischen Neophyten.....	9
<b>2 Ziel der Arbeit .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
3.1 Managementstrategien.....	12
3.2 Pflanzenbiomasse als Rohstoff .....	18
3.3 Atomspektrometrie .....	19
3.3.1 ICP-OES .....	20
3.3.2 ICP-MS .....	22
3.4 Gaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung .....	23
<b>4 Vorstellung untersuchter Pflanzenarten.....</b>	<b>26</b>
4.1 <i>Myriophyllum heterophyllum</i> .....	26
4.1.1 Ursprung und Ausbreitung.....	26
4.1.2 Morphologie .....	28
4.1.3 Habitat.....	29
4.2 <i>Elodea nuttallii</i> .....	30
4.2.1 Ursprung und Ausbreitung.....	30
4.2.2 Morphologie .....	33

4.2.3	Habitat .....	35
<b>5</b>	<b>Material .....</b>	<b>36</b>
5.1	<i>Chemikalien .....</i>	36
5.2	<i>Material .....</i>	37
5.3	<i>Geräte .....</i>	37
<b>6</b>	<b>Methoden .....</b>	<b>39</b>
6.1	<i>Probenahme .....</i>	39
6.2	<i>Bestimmung der Trockenmasse .....</i>	40
6.3	<i>Glühverlust und Glührückstand .....</i>	42
6.4	<i>C, N, C/N-Verhältnis .....</i>	42
6.5	<i>Atomspektrometrie zum Nachweis der Elemente .....</i>	43
6.6	<i>Extraktion .....</i>	44
6.7	<i>GC-MS-Analyse .....</i>	45
<b>7</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>61</b>
<b>Literatur</b>	<b>.....</b>	<b>62</b>
<b>Anlagen</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>
<b>Positionspapier Sybille Engel</b>	<b>.....</b>	<b>71</b>
<b>Fotos</b>	<b>.....</b>	<b>73</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>.....</b>	<b>77</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zunahme der Zahl der aquatischen Neophyten in Deutschland im Zeitraum 1860 bis 2009.....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung einer biologischen Invasion.....	6
Abbildung 3: Schema der „Enemy Release Hypothesis“ .....	7
Abbildung 4: Schema einer ICP-OES mit Echellé- Monochromator.....	20
Abbildung 5: Schema einer ICP-MS mit Quadrupol-Massenspektrometer im Vakuum-System.....	22
Abbildung 6: Schema einer GC-MS-Analyseeinheit.....	24
Abbildung 7: Verbreitung von <i>Myriophyllum heterophyllum</i> in Deutschland (Bundesamt für Naturschutz).....	27
Abbildung 8: <i>M. heterophyllum</i> : Komplette Pflanze (großes Bild), 5-zähliger Blattquirl (kleines Bild).....	28
Abbildung 9: <i>M. heterophyllum</i> -Bestand am Floßgraben in Leipzig (Juli 2016).....	30
Abbildung 10: Verbreitung von <i>Elodea nuttallii</i> in Deutschland (Bundesamt für Naturschutz) .....	32
Abbildung 11: Stängel von <i>Elodea nuttallii</i> und <i>Elodea canadensis</i> .....	33
Abbildung 12: <i>Elodea nuttallii</i> -Bestand in der Parthe im Juni 2016.....	34
Abbildung 13: Heatmap, erstellt mit den Daten des Hydrologischen Jahres 2015 .....	47
Abbildung 14: Streudiagramm der Organik [%] in Bezug auf die Wassertemperatur [°C] .....	48
Abbildung 15: Positionspapier des StALU Mecklenburger Seenplatte zur Biomassepotentialerhebung in Deutschland – Seite 1.....	71
Abbildung 16: Positionspapier des StALU Mecklenburger Seenplatte zur Biomassepotentialerhebung in Deutschland – Seite 2.....	72



---

Abbildung 17: Transporteimer mit frischem Pflanzenmaterial von <i>M. heterophyllum</i> .....	73
Abbildung 18: gemahlenes Pflanzenmaterial von <i>E. nuttallii</i> (links) und <i>M. heterophyllum</i> (rechts) in Begasungsflaschen .....	73
Abbildung 19: Pflanzenextrakt nach 24-stündiger Inkubationszeit im Überkopfschüttler .	74
Abbildung 20: Filtration der Pflanzenextrakte von <i>E. nuttallii</i> und <i>M. heterophyllum</i> .....	74
Abbildung 21: Filtration von <i>Elodea nuttallii</i> .....	75
Abbildung 22: Filtration von <i>Myriophyllum heterophyllum</i> .....	75
Abbildung 23: genutzte Filterpapiere bei der Filtration von <i>Elodea nuttallii</i> .....	76
Abbildung 24: genutzte Filterpapiere bei der Filtration von <i>Myriophyllum heterophyllum</i> .	76

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einige Beispiele für aquatische Neophyten in Deutschland [van de Weyer & Hussner 2008].....	3
Tabelle 2: Methoden für das Management von aquatischen Neophyten [Zehnsdorf et al. 2015].....	13
Tabelle 3: Frisch- und Trockenmasse von <i>Elodea nuttallii</i> - und <i>Myriophyllum heterophyllum</i> -Proben .....	40
Tabelle 4: Elementaranalyse für <i>Elodea nuttallii</i> und <i>Myriophyllum heterophyllum</i> .....	49
Tabelle 5: Ergebnisse der GC-MS-Analyse von <i>Myriophyllum heterophyllum</i> .....	50
Tabelle 6: Ergebnisse der GC-MS-Analyse von <i>Elodea nuttallii</i> .....	53

## Abkürzungsverzeichnis

BfN	Bundesamt für Naturschutz
ERH	Enemy Release Hypothesis
RGR	Relative Wachstumsrate
EICA	Evolution of Increased Competitive Ability
IUCN	International Union For The Conservation Of Nature
DIC	gelöster anorganischer Kohlenstoff
ppm	Teile von einer Million
ICP-OES	Optische Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
EPED	Echellé-Plasma-Emissions-Detektor
GC-MS	Gaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung
C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
S/SL	Split/Splitless-Injektor
BPA	Bisphenol A
PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeine Informationen

Nach Angaben des BUNDESAMTES FÜR NATURSCHUTZ (BfN 2008) wurden seit Entdeckung der neuen Welt 1492 bislang rund 12000 nicht einheimische Gefäßpflanzenarten nach Deutschland eingeschleppt. Diese nicht heimischen, eingeschleppten Arten werden als Neophyten bezeichnet [BfN-Skript 128]. Von diesen Arten kommen rund 1000 Arten unbeständig vor, während 400 sich etablieren konnten. Dabei ist der Anteil neophytischer Arten, die negative Auswirkungen auf die Natur oder den Menschen haben sehr gering. Lediglich 40 Arten können als invasiv bezeichnet werden, darunter die Heraklesstaude (*Heracleum mantegazzianum* Sommier & Levier), die Kanadische Goldrute (*Solidago canadensis* Linné), Lupine (*Lupinus polphyllus* Lindley) und Robinie (*Robinia pseudacacia* Linné), als auch die Wasserpflanze Schmalblättrige Wasserpest (*Elodea nuttallii* (Planch) St. John). Dies sind nur einige Beispiele für invasive Neophyten in Deutschland. Der Eintrag dieser Arten nach Deutschland ist neben der natürlichen Sukzession vor allem aber auf den Menschen zurückzuführen. In zunehmendem Maße greift der Mensch in die Natur ein, durch Industrie, Landwirtschaft oder dem Erschließen von Baugrund [Hussner et al. 2010]. Dieser Einfluss führt zu nachhaltigen Veränderungen in den Ökosystemen, was eine weltweite Verbreitung von Pflanzen- und Tierarten in neue Regionen hervorruft [Vitousek et al. 1997]. Neophytische Arten können dabei drastische Auswirkungen auf einheimische Tier- und Pflanzenarten, sowie auf Prozesse und Funktionen innerhalb eines Ökosystems haben [Thum & Lennon 2010]. Daher werden sie auch als eine der größten Gefahren für die biologische Vielfalt angesehen [Mack et al. 2000, Bax et al. 2003]. Aus diesem Grund ist die Bekämpfung biologischer Invasoren ein notwendiger Schritt, um die biologische Vielfalt zu erhalten und der Verdrängung einheimischer Arten entgegenzusteuern. Allerdings entstehen durch diese Maßnahmen für Regierung und Länder enorme Kosten. Alleine für Entkrautungsmaßnahmen in Deutschlands Gewässern wurden die Kosten auf rund 100 Millionen Euro geschätzt. Mittlerweile dürften die Kosten durch zunehmende Ausbreitung neophytischer Arten deutlich höher liegen [Kurzvorstellung AquaMak]. Aus

diesem Grund kommt der ökologischen Forschung dieses Themas eine immer größere Rolle zu. Bislang wurden schon einige Studien zu Auswirkungen und Ausbreitung von Neophyten durchgeführt. Allerdings wurden die aquatischen Neophyten bislang nicht so gründlich erforscht. Dabei rufen aquatische Neophyten oft große Probleme für Ökosysteme, als auch für den Menschen hervor. Durch den zunehmenden Bewuchs heimischer Gewässer kommt es zu Durchflussstörungen der Gewässer, der Minderung des Hochwasserschutzes aufgrund des eingeschränkten Durchflusses, als auch die zunehmende Nährstoffbelastung der Gewässer. In den letzten Jahren wurde über immer mehr aquatische Neophyten berichtet und immer neue Arten werden dokumentiert [Hussner et al. 2010].

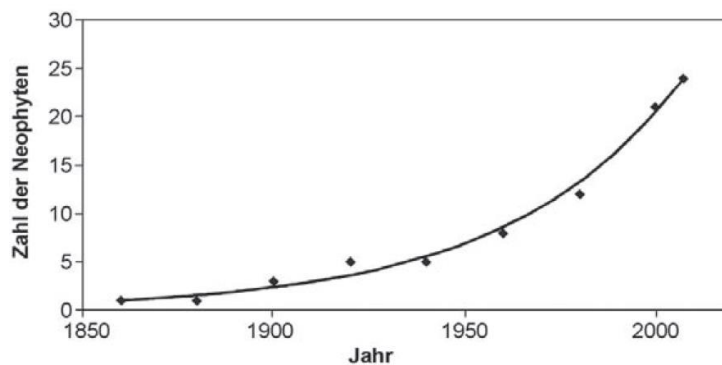


Abbildung 1: Zunahme der Zahl der aquatischen Neophyten in Deutschland im Zeitraum 1860 bis 2009 [Hussner et al. 2010]

Seit 1860 hat sich die Zahl der aquatischen Neophyten in Deutschland verdoppelt. Von diesen mittlerweile 24 Arten gelten 11 als unbeständig und 13 als etabliert. Besonders hervorzuheben ist hier *Elodea nuttallii*, die in Deutschland sehr häufig vorkommt und sich weiterhin in starker Ausbreitung befindet. *E. nuttallii* bildet sehr große Dominanzbestände und drängt lokal bereits indigene Makrophyten zurück. Selbst *Elodea canadensis* wird durch dieses aggressive Wachstum bereits zurückgedrängt. Allerdings weist *E. canadensis* bereits seit einigen Jahren einen Bestandsrückstand auf. Ob dies auf die zunehmende Ausbreitung von *E. nuttallii* zurückzuführen ist, kann nicht zweifelsfrei belegt werden. In Deutschland ist allerdings noch keine indigene Wasserpflanze in Folge von Neophyten ausgestorben. Das

Aussterben dieser Arten hat andere Gründe [van de Weyer & Hussner 2008]. Nachfolgend aufgezeigt (Tabelle 1) sind einige aquatische Neophyten in Deutschland, ihre Erstnachweise, den Stand ihrer Einbürgerung, sowie ihre Ausbreitungstendenz und ihre Tendenz, Dominanzbestände auszubilden. Des Weiteren wird die Herkunft der einzelnen Arten dargestellt.

Tabelle 1: Einige Beispiele für aquatische Neophyten in Deutschland [van de Weyer & Hussner 2008]

Name	Erstnachweis	Eingebürgert	Herkunft	Ausbreitungstendenz	Dominanzbestände bildend
<i>Elodea canadensis</i>	1860 [Bolle 1865]	Ja	Nordamerika	Rückgang	Ja
<i>Elodea nuttallii</i>	1953 [Wattendorf 1964]	Ja	Nordamerika	Expansiv	Ja
<i>Hydrilla verticillata</i>	1907 [Twachtmann 1907]	Nein	Asien	Ausgestorben/verschollen	Nein
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	2003 [Hussner & van de Weyer 2004]	Nein, aber Einbürgerungstendenz	Nord- und Südamerika	Expansiv	Ja
<i>Myriophyllum aquaticum</i>	1988	Ja	Südamerika		Ja

	[Bank-Signon & Patzke 1988]				
<i>Myriophyllum hetero- phyllum</i>	Ende der 1950er  [Stricker 1962]	Ja	Nordamerika	Expansiv	Ja
<i>Sagittaria la- tifolia</i>	1952  [Casper & Krausch 1980]	Ja	Nordamerika		Nein
<i>Shinnersia ri- vularis</i>	1992/3  [Diekjobst & Wolff 1995]	Nein	Mittelamerika	Ausgestor- ben/verschollen	Nein

Neben den in Tabelle 1 dargestellten aquatischen Neophyten sind in Deutschland weitere neophytische Arten bekannt. Dabei wurden neben *Hydrilla verticillata* (L.F.) Royle und *Shinnersia rivularis* (Gray) King & Robinson (siehe Tabelle 1) noch *Lemna aequinoctalis* Babington, sowie *Sagittaria subulata* (Linné) Buchenau nur vorübergehend beobachtet. Im Gegensatz zu *Elodea canadensis*, die mittlerweile einen Bestandrückgang aufweist, gelten heute 5 Arten als expansiv. Dazu zählen neben den in Tabelle 1 dargestellten *Elodea nuttallii*, *Hydrocotyle ranunculoides* L.F. und *Myriophyllum heterophyllum* auch *Lemna minuta* Linné und *Lemna turionifera* Linné [van de Weyer & Hussner 2008].

## 1.2 Definition des Begriffs „Neophyt“

Grundlegend werden Arten, die erst nach Entdeckung der Neuen Welt durch Christopher Columbus (1492) und somit ab 1500 durch den Einfluss des Menschen, sei es durch Schifffahrt, Handel oder Nahrungsmittel in ein bis dato von ihnen nicht besiedeltes Gebiet gelangten, als Neophyten bezeichnen. Arten, die sich seit der Eiszeit ohne den Einfluss des Menschen ausgebreitet oder seitdem in ihrem Ursprungsgebiet vorkommen, werden als indigene Arten bezeichnet. Als Zusatz ist zu sagen, dass Arten, die sich zwar durch den Einfluss des Menschen, aber vor 1500 in neuen Gebieten niederließen, als Archäophyten bezeichnet werden. Der Begriff Neophyt wird 1903/04 erstmals verwendet, um neue Pflanzenarten zu bezeichnen [Sukopp 2001]. Heutzutage werden Neophyten nach Sukopp in vier unterschiedliche Gruppen eingeteilt:

1. Ergasiophyten: Kulturpflanzen, die ohne menschlichen Einfluss nicht in der heimischen Flora überleben könnten
2. Ephemerophyten: Durch Warentransporte eingeschleppt, jedoch aufgrund fehlender Vermehrungsfähigkeit nicht fähig, sich zu etablieren
3. Epökophyten: Eingebürgerte und vom Menschen abhängig
4. Agriophyten: Eingebürgerte Arten, die sich in der Vegetation halten können

Neophyten breiten sich in ihrer neuen Umgebung meist nach folgendem Muster aus (Abbildung 2) [Heger & Trepl 2003].



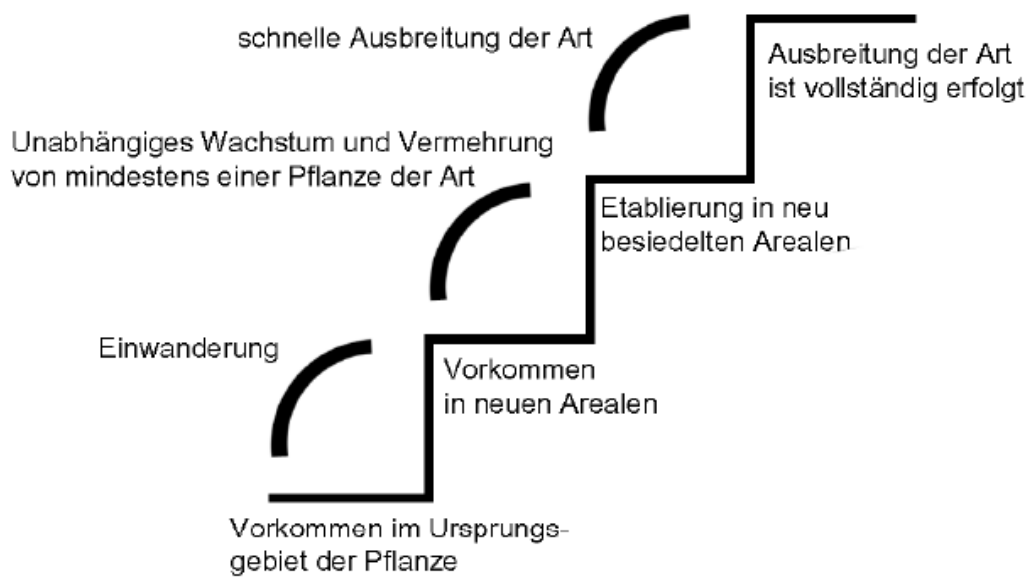


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer biologischen Invasion [Heger & Trepel 2003]

Natürlich kommen die Pflanzen nur in ihrem Ursprungsgebiet vor. Durch Einwanderung oder Verbreitung mithilfe von Schifffahrt [Johnstone et al. 1985], Handel als Zier- oder Aquariumpflanzen [Dehnen-Schmutz 2007], als auch durch verschiedene Vertebraten [Stuckey 1979, García-Álvarez et al. 2015] gelangen sie zu neuen Arealen. Oftmals folgt im neuen Areal eine Etablierungsphase, in der sich der Neophyt an die neue Umgebung anpasst, ohne sich großflächig auszubreiten. Es folgt eine schnelle und großflächige Ausbreitung, die allerdings artspezifisch schnell verläuft. Nach vollständiger Ausbreitung der Art findet keine nennenswerte Ausbreitung mehr statt. Stattdessen kann es in manchen Fällen sogar zu einem Rückgang, bis hin zum Verschwinden der Art kommen [Simberloff & Gibbons 2004]. In extremen Fällen kann es sogar zu einer völligen Verarmung des Areals kommen, indem weder neophytische, noch indigene Arten zurückbleiben. Somit besteht die Gefahr, bei Eintrag eines Neophyten in ein Gewässer, dieses Ökosystem vollständig zu zerstören. Durch fehlenden Pflanzenbewuchs verlieren dann auch viele Tierarten im Gewässer ihre Lebensgrundlage.

Mehrere Faktoren sind für eine erfolgreiche Etablierung und Ausbreitung neophytischer Arten erforderlich. Dazu gehören schnelle Ausbreitungsmöglichkeiten (sei-

tens der Pflanze, als auch des Areals), eine hohe Konkurrenzkraft, eine hohe Reproduktionsrate, eine gute Regenerationsfähigkeit sowie hohe relative Wachstumsraten (RGR – *engl. relative growth rate*) [Rejmanek & Richardson 1996]. Eine neophytische Art besitzt gegenüber indigenen Arten grundsätzlich einen Konkurrenzvorteil, da sie keine Fressfeinde zu befürchten hat. Dies wird auch durch die „Enemy Release Hypothesis“ (ERH) (Abbildung 3) bekräftigt [Keane & Crawley 2002].

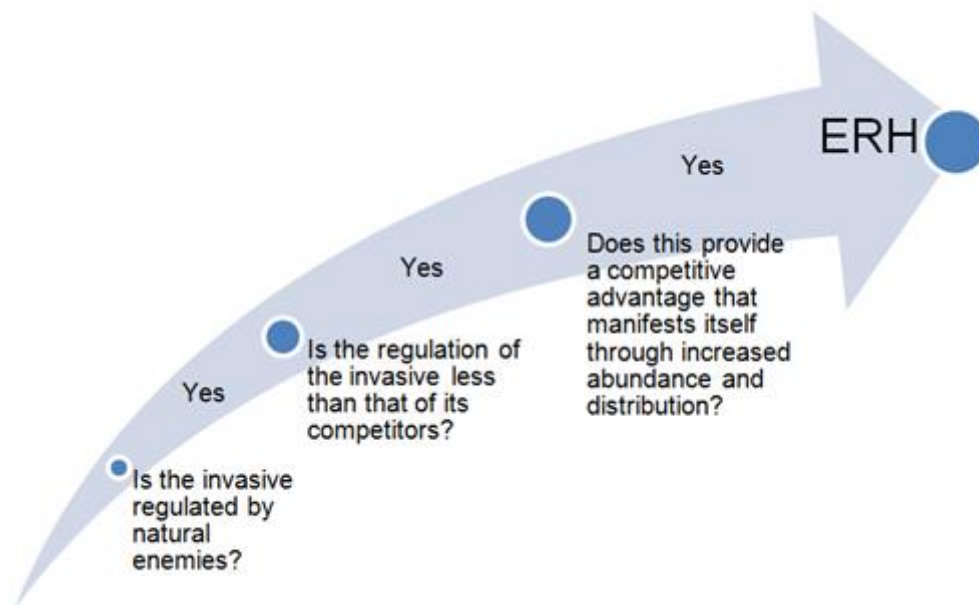


Abbildung 3: Schema der „Enemy Release Hypothesis“ [URL 1]

Die ERH besagt, dass neophytische Arten einen Konkurrenzvorteil gegenüber indigenen Arten besitzen, da die Regulation (unter anderem durch Fressfeinde) die indigenen Arten deutlich mehr trifft als die neophytischen Arten. Dadurch besitzen die neophytischen Arten einen Wettbewerbsvorteil, der sich vor allem auf ihre Größe, sowie auf ihre Ausbreitung positiv auswirkt. Aufbauend auf die ERH stellt die „Evolution of Increased Competitive Ability“ (EICA) dar, dass durch das Ausbleiben natürlicher Feinde Fähigkeiten verloren gehen, diesen Feinden zu widerstehen. Die dadurch verfügbare Energie wird allerdings genutzt, um eine höhere Konkurrenzkraft gegenüber indigener Pflanzen aufzubauen [Blossey & Nötzold 1995]. Eingeführte Pflanzen können demnach höher wachsen, mehr Biomasse produzieren und liefern lebensfähigere Nachkommen als indigene Pflanzen.

### 1.3 Definition des Begriffs „invasiv“

Als invasiv werden Arten bezeichnet, die in ein neues Areal eingetragen wurden und mittlerweile eingebürgert sind. Um als invasiv zu gelten, müssen diese Pflanzen Nachkommen in großer Zahl produzieren, während die Elternpflanzen in deutlicher Entfernung vorkommen. Bei vegetativer Vermehrung (bei Wasserpflanzen wie *Elo-dea nuttallii* und *Myriophyllum heterophyllum*) muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit mehr als 6 Meter in 3 Jahren betragen und sich über eine große Fläche erstrecken [Richardson et al. 2000]. Um aber wirklich als invasiv charakterisiert zu werden, ist Voraussetzung, dass die Art einen großen Einfluss auf die Umwelt ausübt. Dabei kann es sich um Auswirkungen ökosystemischer oder ökonomischer Art handeln. Bei aquatischen invasiven Pflanzen sind diese Auswirkungen unter anderem der Lichtentzug, oder auch das Begrenzen der Wachstumsflächen anderer Arten. Nach der *International Union For The Conservation Of Nature* (IUCN 2000) sind invasive Arten folgendermaßen definiert [IUCN Guidelines 2000]:

1. nicht heimisch
2. in natürlichen und halbnatürlichen Ökosystemen etabliert
3. Veränderungen verursachend
4. Bedrohung der heimischen Biodiversität

Typische Eigenschaften von invasiven Arten sind neben der hohen Konkurrenzkraft weiterhin eine hohe Reproduktionsrate, gute Regenerationsfähigkeit, weitreichende und schnelle Ausbreitungsmöglichkeiten und eine hohe relative Wachstumsrate [Rejmanek & Richardson 1996].

## **1.4 Wissens- und Forschungsstand zu aquatischen Neophyten**

Durch zunehmende Probleme aufgrund aquatischer Neophyten, die sich nicht allein auf die Verarmung der Biodiversität beschränken, rückte dieses Thema in den letzten Jahrzehnten verstärkt in den Fokus der Forschung. Neben dieser Verarmung der Biodiversität sind vor allem für Gewässerunterhaltungsverbände mit aquatischen Neophyten Probleme beim Gewässerunterhalt verbunden. Durch schnelles Wachstum und schnelle Ausbreitung müssen Gewässer in zunehmendem Maße gekrautet und von Pflanzenbiomasse befreit werden. Dies ist mit enormen Kosten verbunden. Durch Krautungsmaßnahmen zeichnet sich aber nur ein geringer Erfolg in der Bekämpfung der Neophyten ab. Natürlich sind kurzfristig Erfolge dokumentierbar, aber durch eben diese Maßnahmen können sich die Pflanzen noch stärker ausbreiten, da bei der Mahd viele Pflanzenteile mit der Strömung fortgetragen werden und sich anderenorts wieder ansiedeln können. Weltweit sorgen neophytische Wasserpflanzen für Probleme verschiedenster Art. Diese erstrecken sich von der Beeinträchtigung von Schifffahrt und Wassersport [Bax et al. 2003], über Probleme für Wasserkraftwerke, Staudämme, oder am Wasser gelegene Industrien, sowie dem Einschränken der Effektivität von Bewässerungssystemen, bis hin zum Schwächen von Hochwasser- und Überschwemmungsschutzmaßnahmen. Weiterhin ist die Bedrohung der Biodiversität oftmals ein Hauptgrund, um aquatische Neophyten zu bekämpfen. Massenbestände dieser Arten sorgen durch die Beschattung ganzer Gewässer für das Absterben submerser Makrophyten und die Abnahme des Sauerstoffgehaltes der Gewässer, was zu negativen Bedingungen für Gewässerflora und –fauna führt [Dextrase & Mandrak 2006].

Obgleich des zunehmenden Interesses an aquatischen Neophyten in der Forschung wird immer noch sehr selten auf die Biologie, Ökologie und Ökophysiologie dieser Arten eingegangen. Doch genau dies ist notwendig, um ein effektives Management dieser Arten zu ermöglichen [Nichols 1991, Zehnsdorf et al. 2015]. Oftmals wird das Thema eher oberflächlich untersucht, im Hinblick auf mechanische, biologische oder auch chemische Kontrolle und Bekämpfung der Neophyten. Bekämpfungsmaßnahmen sind allerdings von Fall zu Fall unterschiedlich erfolgreich,

in einigen Fällen verschwinden auch alle indigenen Wasserpflanzen aus den Gewässern. Um effektivere und nachhaltige Managementstrategien zur Bekämpfung und Kontrolle neophytischer Arten zu entwickeln, verlagert sich die Forschung seit Ende der 90er Jahre mehr und mehr auf die Untersuchung einzelner Arten in Bezug auf ihre Biologie. Als Modellorganismus ist hier die Gattung *Elodea* zu nennen, die auch in dieser Arbeit betrachtet wird. Zahlreiche Publikationen zu *Elodea* wurden bislang von unterschiedlichen Institutionen und Projekten veröffentlicht. Dazu gehört auch das AquaMak-Projekt des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig, in dessen Rahmen diese Arbeit durchgeführt wurde [URL 2].

## 2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der organischen und anorganischen Inhaltsstoffe in der Biomasse zweier aquatischer Neophyten, *Elodea nuttallii* und *Myriophyllum heterophyllum*. Dazu soll zur Analyse der Elemente das Verfahren der Atomspektrometrie eingesetzt werden. Zur Analyse der organischen Inhaltsstoffe wird eine Gaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung eingesetzt. Mithilfe der Analysenergebnisse sollen Inhaltsstoffe in der Biomasse identifiziert und in Bezug auf ihre weitere Verwendbarkeit diskutiert werden. Dabei steht vor allem folgende Frage im Vordergrund: Finden sich Inhaltsstoffe, durch die sich die Biomasse der beiden Neophyten als Rohstoff oder Stofflieferant nutzbar machen lässt? Des Weiteren sollen die Vorteile Dichlormethans bei der Extraktion gegenüber Cyclohexan und Aceton diskutiert werden.

## 3 Grundlagen

Zu Beginn wird verstärkt auf Managementstrategien in der Bekämpfung aquatischer Neophyten eingegangen. Des Weiteren wird die Pflanzenbiomasse als innovativer Rohstoff beschrieben, sowie ihre Verwendungsmöglichkeiten. Anschließend werden die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen beschrieben, so wird die Wirkungsweise der Atomspektrometrie und der Gaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung erläutert.

### 3.1 Managementstrategien

Obgleich das Thema der biologischen Invasionen, insbesondere der aquatischen Invasoren, in den letzten Jahren immer stärker ins öffentliche Bewusstsein gerückt ist und immer stärker in den Fokus der Forschung gerät, ist es weiterhin schwierig, öffentliche und staatliche Unterstützung zu akquirieren. Dies liegt vor allem am Mangel an Verständnis dafür, dass eine untrennbare Verbindung zwischen Natur und Wirtschaft besteht [Mack et al. 2000]. So haben biologische Invasionen direkte wirtschaftliche Folgen. Durch den Verlust von Biodiversität für Fischerei, die Forstwirtschaft, als auch für Pflanzen- und Aquakulturen, sowie Weideflächen. Biologische Invasionen haben nach Mack et al. (2000) zwei Hauptkategorien an wirtschaftlichen Schäden, zum einen den Verlust von wirtschaftlichem Ertrag (Produktion von Nahrungsmitteln wie Fischen oder Pflanzen) und zum anderen dem Entstehen von enormen Kosten für die Bekämpfung dieser Invasionen. Die Bekämpfung beinhaltet dabei die Eindämmung, die Quarantäne und den Versuch der Ausrottung der Invasoren [U.S. Congress 1993]. Dabei können diese Managementstrategien biologisch, chemisch oder auch mechanisch sein, des Weiteren können auch Präventivmaßnahmen durchgeführt werden. Besonders bei den aquatischen Neophyten ist die Spanne des Erfolgs solcher Strategien breit gefächert. In Tabelle 2 sind am Beispiel von *Elodea canadensis* und *Elodea nuttallii* einige Maßnahmen im Hinblick auf Durchführbarkeit, Folgen und Effizienz aufgeführt.

Tabelle 2: Methoden für das Management von aquatischen Neophyten [Zehnsdorf et al. 2015]

Spezies	Methode	Effizienz	Kommentare	Referenz
<b>Biologische Kontrolle</b>				
<i>E.canadensis</i> + <i>E.nuttallii</i>	Aufstockung des Graskarpfen-Bestandes	Medium	Nicht Spezies-spezifisch	Dibble & Kovalenko (2009)
<i>E.nuttallii</i>	Aufstockung des Rotfeder-Bestandes	Medium	Nicht Spezies-spezifisch	Van Donk & Otte (1996)
<i>E.canadensis</i>	<i>Fusarium spec.</i>	N.A.	N.A.	Nichols & Shaw (1986)
<b>Mechanische Kontrolle</b>				
<i>E.canadensis</i> + <i>E.nuttallii</i>	Krautung	Niedrig bis Medium	Nicht Spezies-Spezifisch, Schnelles Nachwachsen	Podraza et al. (2008)
<i>E.nuttallii</i>	Beschatten mit Jutematten	Hoch	Nicht Spezies-spezifisch, nur im ersten Jahr nach der Installation effizient	Hoffmann et al. (2013)



<i>E.canadensis</i>	Kalk-Anwendung (reduzieren der C-Verfügbarkeit)	Niedrig	Nicht Spezies- spezifisch, kurz- zeitig effizient	James (2008)
<i>E.nuttallii</i>	Herabsetzen des Wasserlevels	Niedrig	Nicht Spezies- spezifisch	Barrat-Segretain & Cellot (2007)
<b>Chemische Kontrolle</b>				
<i>E.canadensis</i>	Diquat-Einsatz im Wasser	Hoch	Nicht-Spezies- spezifisch	Glomsik et al. (2005)
<i>E.canadensis</i>	Diquat-Versprü- hen durch Ernte- maschine	N.A.	Minimiert Risiko der unkontrollier- ten Verbreitung, Nicht Spezies- spezifisch	Howard-Williams et al. (1996)
<i>E.canadensis</i>	Acrolein-Einsatz im Wasser	Hoch	Nicht Spezies- spezifisch	Bowmer & Smith (1984)
<b>Prävention</b>				
<i>E.canadensis</i> + <i>E.nuttallii</i>	Einschränkung und Bann des Handels	Niedrig bis Hoch	Nur effizient bei Spezies, die noch nicht etab- liert sind, oder eine limitierte Verbreitung in ei- nem Areal auf- weisen	Champion et al. (2010)

Deutlich wird, dass vor allem chemische Managementstrategien großen Erfolg in der Bekämpfung und Eindämmung biologischer Invasionen mit sich bringen. Allerdings gilt zu beachten, dass durch den Einsatz von Acrolein oder Diquat (Diquat-dibromid) ein weitreichender Einschnitt in das Ökosystem geschieht. Dadurch, dass die Chemikalien, die zugesetzt werden, nicht Spezies-spezifisch sind, werden nicht nur die Neophyten geschädigt, sondern auch alle anderen Pflanzen- und Tierarten. Unter anderem durch Glomsik et al. (2005), Howard-Williams et al. (1996) und Bowmer & Smith (1984) wurden auch Studien zu anderen Stoffen zur chemischen Kontrolle von neophytischen Wasserpflanzen durchgeführt. In Neuseeland, einem Land, das sehr darauf bedacht ist, seine einheimische Flora und Fauna zu schützen, wurde eine Studie durchgeführt, indem als Chemikalien Endothall, Triclopyr und Dichlobenil verwendet wurden [Hofstra & Clayton 2001]. Jede dieser Chemikalien wies eine hohe Effizienz auf. Doch auch diese Chemikalien sind nicht Spezies-spezifisch. Weiterhin ist der Einsatz von Chemikalien als Herbizide in Gewässern in Deutschland verboten.

Für die biologische Kontrolle der Invasionen durch neophytische Wasserpflanzen werden zumeist Fressfeinde eingesetzt. Oftmals wird dabei der Graskarpfen (*Ctenopharyngodon idella* Valenciennes), auch Grasfisch oder weißer Armur genannt, eingesetzt. Diese Karpfen-Art stammt ursprünglich aus Asien und ist somit in Deutschland auch ein Neozoen. Allerdings ist der Einsatz in Fließgewässern gänzlich untersagt, der Graskarpfen darf nur in Stehgewässern eingesetzt werden. Dabei gehen mit unsachgemäßem Besatz der Gewässer mit Graskarpfen einige Probleme einher. Die Verdauung von Graskarpfen ist äußerst ineffizient, was dazu führt, dass sie sehr viel Nahrung benötigen. Zur biologischen Bekämpfung von aquatischen Neophyten ist dies natürlich von Vorteil, da durch die Karpfen große Mengen an Kraut weggefressen werden [Cross 1969]. Allerdings stellt der übermäßige Appetit dieser Karpfen in der Folge größere Probleme dar, als nur der Krautbewuchs durch aquatische Neophyten [Dibble & Kovalenko 2009]. Da man die nötige Besatzmenge als Gegenmaßnahme für ein befallenes Gewässer nur schlecht abschätzen kann, besteht die Gefahr, zu viele Fische einzusetzen. Dies kann dazu führen, dass nicht nur die Neophyten, sondern auch andere Pflanzen gefressen werden und somit das Gewässer komplett abgefressen wird. Weiterhin ist der Graskarpfen als Speisefisch nicht sehr beliebt, weshalb Bestände auch nur gering

durch Angler ausgedünnt werden. Mehrere Berichte von Teich- und Anglerverbänden zeigen drastische Folgen eines Überbesatzes auf [Avault Jr. 1965]:

- Anstieg der Nährstoffe im Wasser
- zunehmende und stärkere Algenblüten
- fehlende Pflanzen sorgen für beschränkte Laichmöglichkeiten
- Jungfische, Weichtiere und Kleinstlebewesen verlieren ihren Lebensraum
- schlechte, stark schwankende Wasserwerte

„Zurück bleibt ein leergefegtes Gewässer. In der Teichwirtschaft, wo die Teiche intensiv genutzt werden, mag so etwas funktionieren. In einem natürlichen Gewässer ist das allerdings als Totalschaden einzustufen.“ [Zitat: Gewässerwart Blog – Der Blog für Gewässerwarte von Gewässerwarten URL 3]. Eine weitere, in Deutschland zudem heimische Art zur biologischen Kontrolle aquatischer Neophyten ist die Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*) [Van Donk & Otte 1996]. Ihre Lebensweise ist stark an Wasserpflanzen gebunden. Da die Rotfeder auch in Deutschland heimisch ist und nicht so aggressiv in ihrem Fressverhalten wie der Graskarpfen vorgeht, ist sie deutlich ökologischer im biologischen Management aquatischer Neophyten. Ein einzelner Fisch kann täglich bis zu 25 Gramm *Elodea*-Biomasse fressen [Nurminen et al. 2003]. Zudem dient das vermehrte Auftreten der Neophyten dem Ausbilden neuer Bestände der Rotfeder, die zu den gefährdeten Fischarten in Deutschland zählt [BfN 2009].

Neben den bereits dargestellten biologischen und chemischen Managementstrategien ist die am weitesten verbreitetste die mechanische. Im Gegensatz zu eben jenen biologischen und chemischen Strategien sind sie aber erheblich teurer und arbeitsintensiver und müssen regelmäßiger durchgeführt werden. James (2008) stellt in seiner Studie die Erfolge mit Kalk ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) dar, welcher dem Wasser verabreicht wurde. Ziel war es, die Produktivität der Wasserpflanzen temporär durch gelösten anorganischen Kohlenstoff (DIC – *engl. dissolved inorganic carbon*) zu limitieren. James (2008) kam zu dem Schluss, dass Kalk-Applikation das Wachstum der Makrophyten erheblich stören kann und somit als mechanische Gegenmaßnahme durchaus in Betracht zu ziehen wäre. Jedoch gilt auch hier, dass für eine Anwendung in der freien Natur großer Aufwand betrieben werden müsste, ebenso ist nicht auszuschließen, dass sich der Kalk negativ auf die restliche Gewässerflora

und –fauna auswirkt. Eine weitere, 2013 entwickelte Methode ist das Beschatten der Makrophyten mithilfe von Jutematten. Dazu wurden 150 m<sup>2</sup> große Areale mit Jutematten abgedeckt. Bei *E. nuttallii* konnte hierbei eine signifikante Wachstumsreduzierung festgestellt werden. Da *E. nuttallii* selbst mindestens 15% Lichteinstrahlung [Nichols et al. 1986] zum Wachstum benötigt, ist die erfolgreiche Bekämpfung abhängig von der Maschengröße der Jutematten, sowie auch die Jutematten selbst von anderen Umweltbedingungen abhängig sind. Jedoch konnte nachgewiesen werden, dass das Wachstum von *E. nuttallii* durch die Matten kontrolliert werden kann, wenngleich der Erfolg vorrangig in der ersten Zeit nach der Beschattung auftritt [Hoffmann et al. 2013]. Der wohl schwerwiegenste Grund für den recht kurzweiligen Erfolg mit Jutematten liegt vor allem daran, dass die Matten meist nur eine Vegetationsperiode lang halten, aufgrund von Schäden jedoch schnell ihren Nutzen verlieren. Hinzu kommt, dass sie aufgrund ihrer biologischen Abbaubarkeit schnell oder minder schnell geschädigt werden [Zehnsdorf et al. 2015]. Die wohl weit verbreitetste und von den mechanischen Methoden effektivste Methode ist das Krauten, mithilfe von Mähbooten, als auch der Einsatz von Mähkörben, mit denen die Fluss- und Seesohlen entkrautet werden. Die dabei anfallende Pflanzenbiomasse wird den Gewässern entnommen. Krautungsmaßnahmen dienen neben der Bekämpfung der aquatischen Neophyten unter anderem auch der Sicherung des Wasserdurchflusses und somit dem Hochwasser- und Flutschutz. Weiterhin wird somit ein flüssiger Schiffsverkehr gewährleistet. Neben den positiven Auswirkungen dieser Maßnahmen sind allerdings auch negative zu nennen. Durch das Krauten können abgetrennte Pflanzenteile durch die Strömung zu neuen Arealen transportiert werden und sich dort wieder neu ansiedeln [White 1979, Stuckey 1979]. Durch die zunehmende Ausbreitung, besonders von *E. nuttallii* müssen immer mehr Gewässer gekrautet werden, was zu mehr Kosten führt (siehe Anhang Abbildungen 15 + 16). Auch müssen mehr Arbeitnehmer mit diesen Aufgaben betraut werden, oder mehr Firmen beauftragt werden. Das vielleicht größte Problem der Entkrautung liegt aber bei der anfallenden und entnommenen Biomasse selbst. Da bislang keine wirtschaftlich nutzbare Alternative aufgezeigt werden konnte, verbleibt die Biomasse zumeist am Ort ihrer Entnahme. Sie wird oberhalb der Böschung abgelegt und entweder liegen gelassen, oder von Landwirten in die Ackerflächen eingearbeitet. Durch ihre hohen Nährstoff- und Phosphorfrachten hat sie dort noch den positiven

Effekt des Düngens. Lediglich in städtischen Gewässern wird die Biomasse abtransportiert, um in Kompostierungsanlagen verwertet zu werden.

### 3.2 Pflanzenbiomasse als Rohstoff

Wie schon erwähnt, ist bislang kaum eine wirtschaftliche Nutzungsmöglichkeit der Pflanzenbiomasse bekannt, da die Bergung der Biomasse, sowie der Abtransport hohe Kosten und hohen Arbeitsaufwand verursachen. Zumeist wird sie als organischer Abfall Kompostierungsanlagen zugeführt. Um aber eine Kompostierung der Biomasse durchzuführen, müssen andere Pflanzen oder geschreddertes Holz hinzugegeben werden, um dem Material Struktur zu verleihen und somit eine gute Durchlüftung zu gewährleisten [Zehnsdorf et al. 2011]. Vor allem der hohe Wassergehalt in der Biomasse stellt oftmals ein Problem dar. Für *E. nuttallii* liegt der Wert für die Trockenmasse lediglich bei 6-9 % [Elger & Willby 2003], bei *M. heterophyllum* liegt er mit 10 % [Boyd 1968] nur unwesentlich höher. Jedoch birgt die Biomasse auch Möglichkeiten für verschiedenste Verarbeitungen. Aufgrund ihres weitreichenden Vorkommens, sowie dem schnellen Wachstum fallen enorme Mengen an Biomasse an. Alleine im Goitzschesee bei Bitterfeld-Wolfen, einem ehemaligen Bergbauggebiet in Sachsen-Anhalt konnten 17 kg/m<sup>2</sup> an Biomasse geborgen werden. Bei einer Größe von 13,3 km<sup>2</sup> fallen somit große Mengen an Biomasse an [Rönicke et al. 2005]. Vor allem für die Herstellung von Biogas, als Co-Substrat in Maissilage, ist diese Biomasse interessant. Durch ihre hohe Spurenelementfracht entfällt die weitere Zugabe eben dieser in den Bioreaktor. Weiterhin sind vielfältige Verwendungen als Dünger [National Research Council 2002], zur Biokohle-Produktion [Pörschmann et al. 2015] oder auch für Energierückgewinnung von Rohstoffen in Feuerungsanlagen denkbar [Muñoz Escobar et al. 2011]. Da in *E. nuttallii* keine toxischen Stoffe oder Bitterstoffe aufgefunden worden [Hegnauer 1963], kann die Pflanze hinsichtlich pharmazeutischer und kosmetischer Gesichtspunkte interessant sein. Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig konnte bereits eine Tagescreme mit *Elodea*-Extrakt herstellen. *Elodea* ist hoch vital, da sie wichtige Vitamine (E, C, K und B), sowie Chlorophyll und Spurenelemente enthält, was sie

als Rohstoff in der Naturkosmetik nutzbar machen lässt. Des Weiteren konnten erste Analysen hinsichtlich ihrer pharmazeutischen Nutzung durchgeführt werden [Muñoz Escobar et al. 2011]. Die Anwesenheit von  $\beta$ -sitosterol (bis zu 462 ppm) lässt *Elodea* für eine pharmazeutische Nutzung in Frage kommen.  $\beta$ -sitosterol wird in der Behandlung von vergrößerten Prostata und Prostata-Hyperplasie eingesetzt [Berges et al. 2000]. Allerdings konnten in anderen Pflanzen deutlich höhere Konzentrationen an  $\beta$ -sitosterol gefunden werden. So enthält Basilikum 896-1705 ppm, im Salbei 2450 ppm und Weißdorn gar 5100-6200 ppm an  $\beta$ -sitosterol. Nichtsdestotrotz bietet *Elodea* verschiedenste Möglichkeiten einer weiteren Verwendung. Aufgrund des hohen Vorkommens, der schnellen Ausbreitung und des großen Biomassepotentials sind aquatische Pflanzen und insbesondere Neophyten interessante Rohstofflieferanten. Ein großer Vorteil dieser Biomasse lässt sich aber deutlich aufzeigen. Sobald diese Biomasse geerntet wurde, kann sie als Rohmaterial verwendet werden, ohne dass weitere Produktionskosten hierfür anfallen. Dies macht sie als Rohstoff interessant und die hohen anfallenden Massen auch wirtschaftlich nutzbar [Muñoz Escobar et al. 2011]. Um aber für die weitere Verwendung nutzbar gemacht zu werden, müssen vorher die schon angesprochenen Probleme wie der Abtransport oder der hohe Wasseranteil beachtet werden und verbessert, beziehungsweise nachhaltiger und wirtschaftlicher gestaltet werden.

### 3.3 Atomspektrometrie

Nachfolgend werden die benutzten Verfahren der Atomspektrometrie aufgezeigt. Zum einen die ICP-OES, zum anderen die ICP-MS zur Spurenelementanalyse. Beide Verfahren zeichnen sich dabei durch präzise Ergebnisse, sowie schnelle Durchführung und einfache Handhabung aus.

### 3.3.1 ICP-OES

In diesem Kapitel wird die ICP-OES vorgestellt, mit der die Elementaranalyse durchgeführt wurden. Mithilfe der Optischen Emmissionsspektrometrie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES – engl. – *inductively coupled plasma optical emission spectrometry*) lassen sich Chemische Elemente in Proben qualitativ und quantitativ nachweisen. Für jedes Element senden angeregte Atome eine charakteristische elektromagnetische Strahlung aus, die gemessen werden kann. Mithilfe eines induktiv gekoppelten Plasmas können feste, flüssige als auch gasförmige Proben untersucht werden. Die Proben werden dabei durch externe Energiezufuhr in einen Plasmazustand überführt. Zur Anregung nutzt man Argongas, welches eine hohe Ionisierungsenergie von 15,76 eV aufweist. Weiterhin ist es chemisch inert und weist keine Bandenspektren auf. Mithilfe der hohen Anregungsenergie von ca. 6000 K wird das Probenaerosol in den Plasmazustand überführt (Abbildung 4) [Greenfield 1964, Fassel 1965].

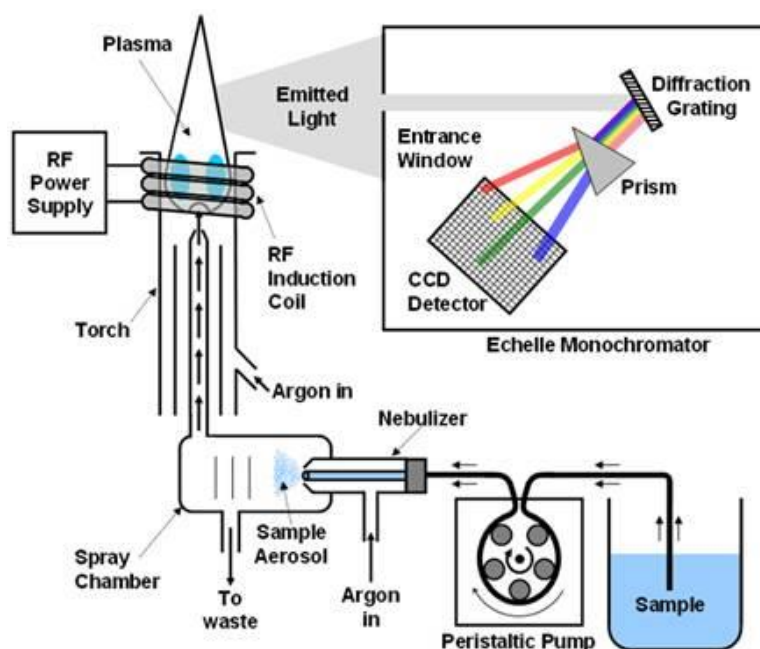


Abbildung 4: Schema einer ICP-OES mit Echellé- Monochromator [URL 4]

In Abbildung 4 ist das Schema einer ICP-OES dargestellt. Die Probe wird in ein Aerosol überführt. Dies wird über ein pneumatisches Zerstäubersystem erreicht. Anschließend wird das Probenaerosol mithilfe von Argon als Trägergas in die ICP-Fackel überführt. Argon dient hier weiterhin als Kühlmedium. In der Fackel wird über die Spulen eines Hochfrequenzgenerators (27 MHz - 40 MHz) das Aerosol-Argon-Gemisch angeregt, mit einer Temperatur von 6000 K. Zur Anregung wird im Hochfrequenzfeld der Spulen ein Teslafunken gezündet. Das Plasma heizt sich auf bis zu 12000 K auf. Durch diese Energie werden die äußeren Valenzelektronen der Elemente energetisch überladen. In der Spitze der ICP-Fackel kühlt das Plasma wieder etwas ab und die Elektronen gelangen zurück in ihren Grundzustand. Dadurch wird die hinzugefügte Energie als Lichtenergie frei. Diese Lichtenergie wird über einen Echellé-Monochromator, auch Echellé-Plasma-Emissions-Detektor (EPED) genannt, gemessen. Dieser besteht aus einem Echellé-Gitter, welches das Emissionslicht in die verschiedenen Wellenlängen aufspaltet. Diese Wellenlängen gelangen auf einen CCD-Detektor, mit dessen Hilfe die Intensität der einfallenden Strahlen gemessen werden kann [Barnard et al. 1993]. Durch die elementspezifischen Emissionsstrahlen können so, mithilfe eines Computers, die Elemente bestimmt und quantifiziert werden. Mit der ICP-OES können Elemente in Konzentrationsbereichen von mg/l bis µg/l analysiert werden. Dabei können bis zu 60 Elemente (Metalle und Nichtmetalle) gleichzeitig bestimmt werden. Für die Analyse werden die Proben in eine angesäuerte, wässrige Lösung überführt. Mithilfe der ICP-OES kann so ein Gesamtgehalt von bis zu 10 g/l einer gelösten Substanz ermittelt werden. Für die Analyse von festen Proben müssen diese mithilfe von Aufschlussverfahren in Lösung gebracht werden. Dazu kann mit HF/HCl oder HF/HNO<sub>3</sub> das Probenmaterial durch einen Druckaufschluss und dem anschließenden Abrauchen mit HClO<sub>4</sub> zum Entfernen von Silikaten oder überschüssiger Säure in eine Probelösung überführt werden. Eine weitere Möglichkeit zum Aufschluss fester Proben ist der Königwasser-Aufschluss. Bei diesem wird mithilfe von Königswasser, einem Gemisch aus Salzsäure (HCl) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) im Verhältnis von 3:1 der maximal lösliche Anteil der Probe in Lösung gebracht und Rückstände, die sich nicht gelöst haben, abgetrennt. [URL 5].



### 3.3.2 ICP-MS

Die Massenspektrometrie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS – engl. *–inductively coupled plasma mass spectrometry*) ist eine Weiterentwicklung der ICP-OES. Sie wird aufgrund ihrer niedrigeren Nachweisgrenzen zur qualitativen und quantitativen Analyse von Spurenelementen genutzt. Mit einem Konzentrationsbereich von  $\mu\text{l}$  bis zu  $\text{pg/l}$  lassen sich auch kleinste Spuren nachweisen. Dabei werden bei der ICP-MS Metalle und einige Nichtmetalle mit einem Gesamtgehalt an gelöster Substanz von  $1\text{ g/l}$  aus angesäuerten, wässrigen Lösungen bestimmt. Der Aufbau der ICP-MS ist dem der ICP-OES sehr ähnlich. Weiterhin ist es mit der ICP-MS möglich, durch Kopplung mit einem Laserablationsgerät Feststoffproben direkt zu analysieren, als auch eine Isotopenanalyse durchzuführen. Auch bei der ICP-MS wird die Probe in ein Plasma überführt. Allerdings wird nicht die Lichtemission gemessen. Die Ionen aus dem Plasma gelangen über zwei Blenden, Sampler und Skimmer genannt, in ein Vakuum-System (Abbildung 5) [Houk et al. 1980].

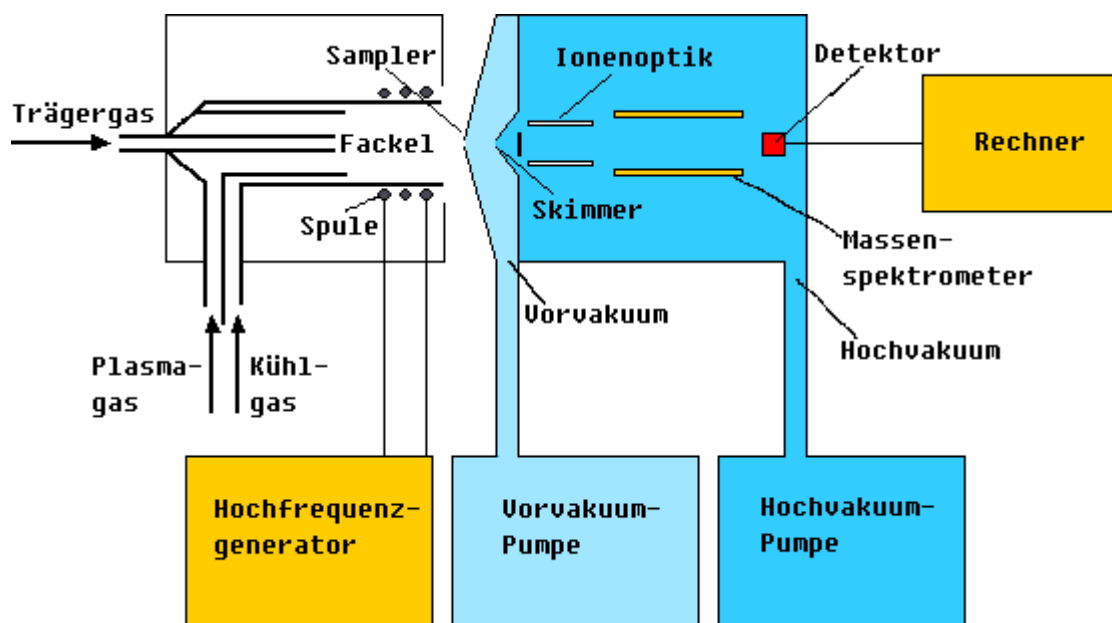


Abbildung 5: Schema einer ICP-MS mit Quadrupol-Massenspektrometer im Vakuum-System [URL 6]

In der Ionenoptik des Gerätes werden die Ionen fokussiert. Anschließend werden sie durch das Massenspektrometer nach unterschiedlichen Ionenmassen aufgetrennt. Zumeist wird dieses über Quadrupol-Massenspektrometer erreicht. An vier Metallstäben liegt eine Spannung an, sodass die Stäbe als Elektroden dienen. Dabei liegt an gegenüberliegenden Metallstäben eine Hochfrequenz-Spannung an und an jeweils einem Metallstab-Paar eine Gleichspannung. Die Ionen werden somit auf eine Spiralbahn gelenkt. Nur Ionen mit einem bestimmten Masse-Ladungs-Verhältnis gelangen durch den Quadrupol zum Detektor. Das Verhältnis der Spannungen bestimmt dabei, welche Masse detektiert werden kann. Um andere Massen zu detektieren, werden die Spannungen verändert. Die ICP-MS erfasst die Ionenmassen sequentiell. Dies geschieht in 3ms oder weniger und somit können nach und nach alle Ionenmassen detektiert werden. Diese werden an einen Computer weitergeleitet, der sie als Diagramm ausgibt [Jenner et al. 1990].

### 3.4 Gaschromatographie mit Massenspektrometer-Kopplung

Das Verfahren der Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (im Folgenden kurz GC/MS genannt) dient der Auftrennung eines Stoffgemisches, sowie der Identifizierung und Quantifizierung der einzelnen Komponenten. Eine GC ist allerdings nur zur Analyse von Komponenten einsetzbar, die gasförmig sind oder sich unzersetzbar verdampfen lassen. Bei modernen GC-Geräten besteht die Trennsäule aus einer *Fused-silica*- oder Quarzglaskapillare. Ältere Systeme nutzten Edelstahl- oder Glasrohre mit einem Durchmesser von 3-6 mm. Heutige Kapillaren sind 10-200 m lang [Bartle & Myers 2002]. Zum Auftrennen des Probengemisches wird die Probe in die Kapillare eingespritzt, die sich in einem temperierbaren Ofen befindet (Abbildung 6). Dabei wird die Kapillare stets von einem inerten Trägergas durchströmt. Oftmals nutzt man hierfür Stickstoff oder Helium. Das Trägergas wird als mobile Phase des GC-Systems bezeichnet. Die Kapillare ist mit einer stationären Phase ausgekleidet, meist werden Polyorganosiloxane genutzt. Die Auftrennung der einzelnen Komponenten erfolgt durch die unterschiedlichen Siedepunkte der Einzelsubstanzen im Probengemisch. Die Einzelsubstanzen wechselwirken

über Adsorption und Desorption mit der stationären Phase. Dabei bestimmen die Eigenschaften der Komponenten, Polarität, Vorkommen verschiedener funktioneller Gruppen und Struktur die Stärke der Wechselwirkungen. Unpolare Substanzen bilden ausschließlich Van-der-Waals-Wechselwirkungen aus, während polare Komponenten auch polare Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden können.

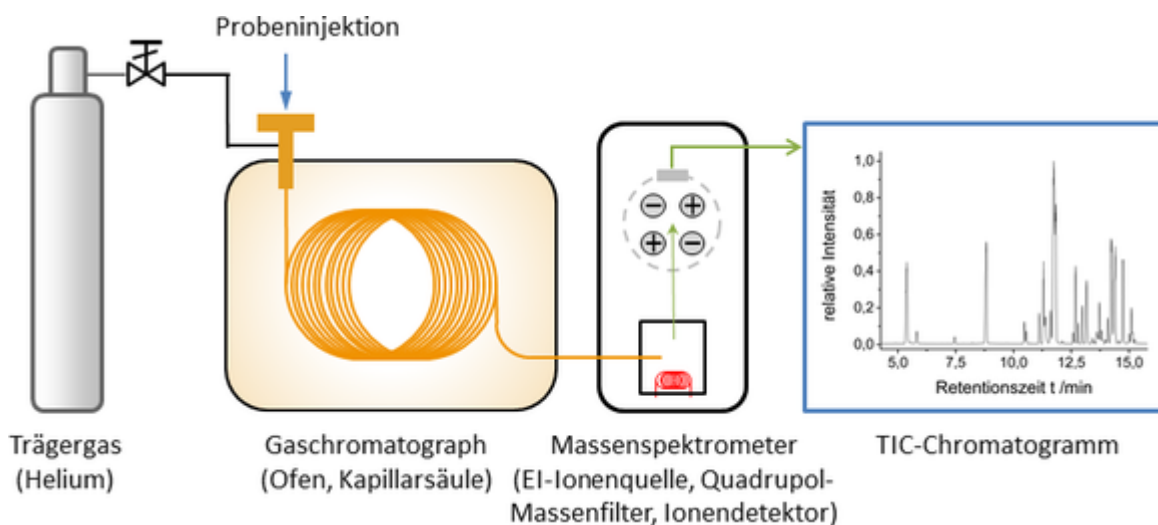


Abbildung 6: Schema einer GC-MS-Analyseeinheit [URL 7]

Die einzelnen Stoffkomponenten verweilen somit aufgrund ihrer Polarität und ihres Dampfdrucks unterschiedlich lange in der stationären Phase. Gemessen wird die Retentionszeit der Komponenten, also wie lange die Komponente braucht, um durch die Kapillare zu gelangen [Bartholomé et al. 1980]. Zur anschließenden Identifizierung und Quantifizierung der einzelnen Komponenten ist bei einer GC-MS ein Massenspektrometer an die GC gekoppelt (Abbildung 6). Nach dem Auftrennen werden die getrennten Stoffe ionisiert. Dazu nutzt man chemische Ionisation oder Feldionisation. Häufiger wird die Elektronenstoßionisation eingesetzt, bei der durch ionisierende Strahlung ein Elektron aus einem Molekül entfernt wird, sodass es als positiv geladenes Kation in das Massenspektrometer gelangt. Im Massenspektrometer werden die Ionen mithilfe eines Quadrupol-Analysators entsprechend ihrer Massen analysiert (siehe Kapitel 3.3.2). Mithilfe eines Ionendetektors werden die

Ionen, die durch den Quadrupol gelangen, detektiert und in einem Chromatogramm entsprechend ihrer Retentionszeiten dargestellt [Jenner et al. 1990].

## 4 Vorstellung untersuchter Pflanzenarten

In diesem Kapitel werden die beiden in dieser Arbeit untersuchten Wasserpflanzen vorgestellt. Beide Pflanzen sind aquatische Neophyten und als invasiv anzusehen. Für jede der beiden Pflanzen werden Ursprung und Ausbreitung der Art, die Morphologie und auch ihr Habitat vorgestellt.

### 4.1 *Myriophyllum heterophyllum*

#### 4.1.1 Ursprung und Ausbreitung

Das Verschiedenblättrige Tausendblatt (*Myriophyllum heterophyllum* Michaux) gehört zur Familie der Haloragaceae und stammt ursprünglich aus dem südöstlichen Nordamerika. Neben *M. heterophyllum* umfasst diese Gattung 35-45 Unterarten, dessen bekanntesten Vertreter sind das Wechselblütige Tausendblatt (*Myriophyllum alterniflorum* DC.), das Brasilianische Tausendblatt (*Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc.), das Ährige Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum* Linné), sowie das Quirlige Tausendblatt (*Myriophyllum verticillatum* Linné) [Aiken et al. 1979]. In Europa wurde *M. heterophyllum* als Neophyt eingeschleppt und wird mittlerweile stellenweise als heimisch angesehen [Sheppard et al. 2006]. Während es bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts (1890-1899) als Zier- und Aquariumspflanze in den Handel gelangte, wurde der Erstnachweis für *M. heterophyllum* für Deutschland um 1919 in der Dresdner Heide erbracht [Engmann 1919]. Ende der 1950er Jahre wurden vermehrte Funde im Leipziger Hafengelände dokumentiert [Stricker 1962]. Wie auch andere Neophyten breitet sich *M. heterophyllum* zunehmend aus, vermehrt sich dabei rein vegetativ. Während in Deutschland bislang lediglich punktuell Nachweise erbracht werden (Abbildung 7), sind aus anderen europäischen Ländern (Frankreich, Belgien, Niederlande, Österreich und Schweiz) weitere Vorkommen bekannt. Da sich *M. heterophyllum* vegetativ vermehrt, reichen auch diesem Neophyten kleinste Pflanzenteile, um sich neu anzusiedeln. Halstead et al. (2003) sprechen allein durch Sprossabschnitt von theoretisch 250 Millionen neuen Pflanzen pro Jahr. Weitere Ausbreitungsmöglichkeiten bestehen für *M. heterophyllum* durch

Fernausbreitung mithilfe von Wasservögeln [Spanghel & Scharrenberg 1985], sowie Mahdmaßnahmen, Angeln und Boot- und Schifffahrt [Casper & Krausch 1980].

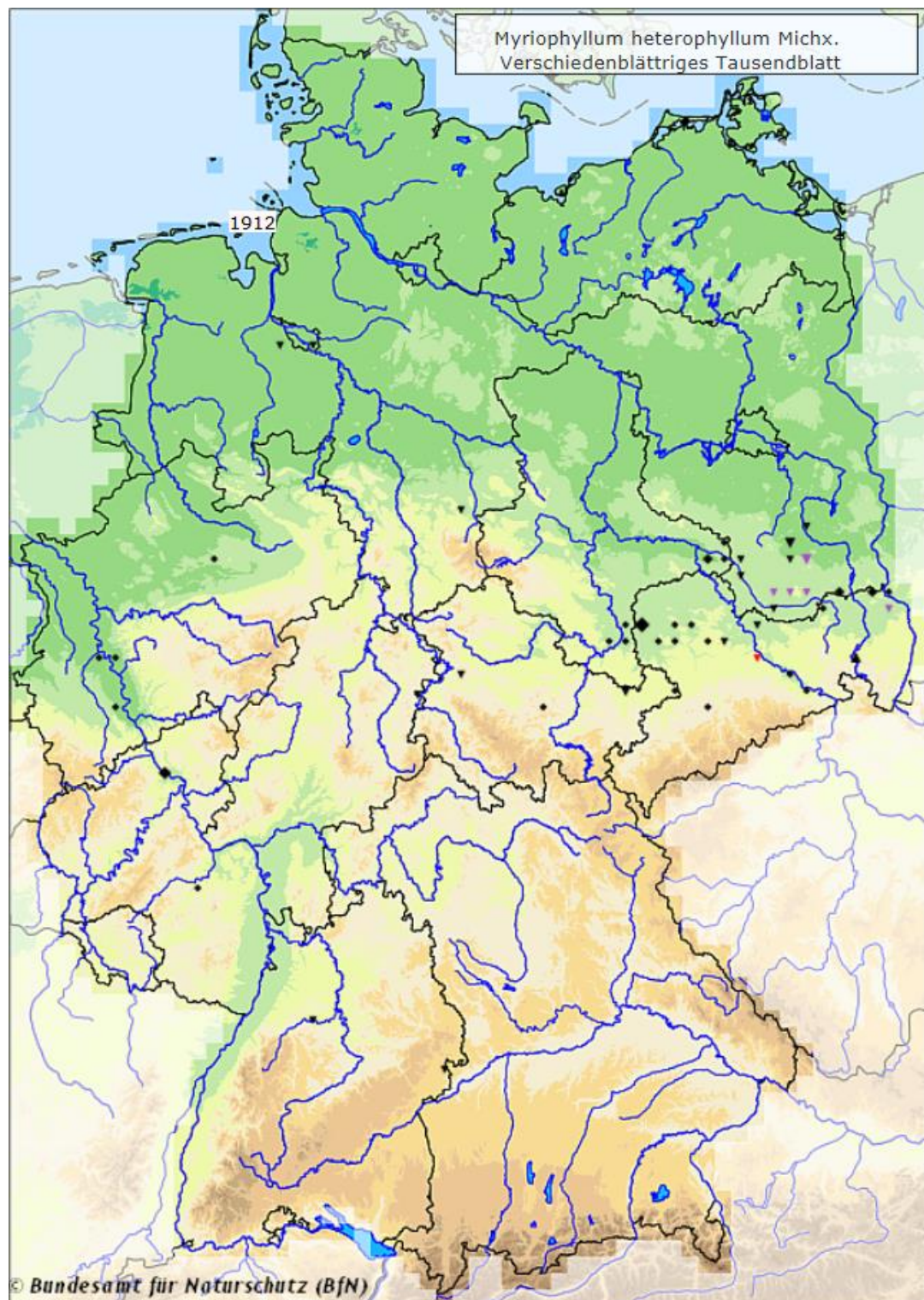


Abbildung 7: Verbreitung von *Myriophyllum heterophyllum* in Deutschland (Bundesamt für Naturschutz)  
[URL 8]



### 4.1.2 Morphologie

*Myriophyllum heterophyllum* ist eine immergrüne submerse Wasserpflanze, deren Blütezeit von Juni bis September ist. Während dieser Blütezeit bildet sie auch emerse Triebe von 10-15 cm Länge aus, welche auch aus dem Wasser herausragen können. Im Gegensatz zu *Myriophyllum spicatum* sind die Blätter von *M.heterophyllum* in 5 bis 6- zähligen Quirlen anstatt 4-zähligen Quirlen angeordnet (Abbildung 6). Die Blätter sind gefiedert und können bis zu 50 mm lang werden, wobei sie länger als die Internodien werden können (Abbildung 8) [Casper & Krausch 1981]. Die Anzahl der Quirle ist für die Bestimmung der Art ein wichtiges Indiz. Ein besonderes Merkmal weisen die Blätter bei verschiedenen Temperaturen auf.



Abbildung 8: *M. heterophyllum*: Komplette Pflanze (großes Bild), 5-zähliger Blattquirl (kleines Bild)

Während die Wassertemperatur 12-16 °C beträgt, bilden sich gefiederte Blätter mit 5 bis 20 fadenförmigen Abschnitten aus. Bei Wassertemperaturen von 20-25 °C sind die Blätter ungeteilt und gezähnt. *M.heterophyllum* bildet darüber hinaus sehr

ausgedehnte Bestände aus, die einen großen Teil der Gewässer bedecken können. Dabei erreicht sie mit ihren Trieben eine Länge von 30-250 cm.

#### 4.1.3 Habitat

Obgleich *Myriophyllum heterophyllum* ein eingewanderter Neophyt ist, findet es hier in Deutschland ihrem Herkunftsgebiet ähnliche Bedingungen vor. Wie in Nordamerika schwanken die Wassertemperatur in Europa zwischen 12-25 °C während Frühjahr, Sommer und Herbst. Lediglich im Winter fällt diese Temperatur, teilweise bis auf 4 °C. Doch selbst unter einer Eisschicht und in solch kaltem Wasser, ist es *M.heterophyllum* möglich zu überwintern. Durch das Ausbilden sehr großer Bestände (Abbildung 7) geht es äußerst invasiv vor, auch seine hohe Lichtaufnahme und die damit einhergehende Beschattung anderer Arten durch die langen Triebe kommen *M.heterophyllum* zugute. Dabei wächst es in nahezu allen flachen Süßwassern, bis zu einer Tiefe von 10 Metern, je nach den vorherrschenden Lichtverhältnissen [Nichols et al. 1986]. Des Weiteren besitzt *M. heterophyllum* eine breite pH-Toleranz von 5,4 - 11 [Aiken et al. 1979].





Abbildung 9: *M. heterophyllum*-Bestand am Floßgraben in Leipzig (Juli 2016)

## 4.2 *Elodea nuttallii*

### 4.2.1 Ursprung und Ausbreitung

Die submerse Pflanze *Elodea nuttallii* (Planch) St. John gehört zur Gattung *Elodea*, auch Wasserpest genannt. Diese Gattung gehört zur Familie der *Hydrocharitaceae*, den Froschbissgewächsen. Zur Gattung *Elodea* gehören neben *Elodea canadensis* Michaux und *Elodea nuttallii* (Planch) St. John auch *Elodea potamogeton* (Bertero) Espinosa, *Elodea bifoliata* St. John, sowie *Elodea callitrichoides* (Rich.) Caspary. *E. nuttallii*, *E. canadensis* und *E. bifoliata* sind nordamerikanischer Herkunft, während *E. callitrichoides* und *E. potamogeton* aus Südamerika stammen [Cook und Urmi-König 1985]. Mit dem gesteigerten Aufkommen des Schiffverkehrs zwischen Amerika und Europa gelangte *Elodea* Anfang des 19. Jahrhunderts nach Europa, der erste offizielle Nachweis für *Elodea canadensis* wurde 1836 in Nordirland erbracht [Bowmer et al. 1995]. Von dort verbreitete sich *Elodea canadensis* rasend schnell

durch Europa. Nach dem ersten Nachweis 1859 in Berlin, innerhalb von nur 20 Jahren über ganz Mitteleuropa. Der erste offizielle Nachweis von *Elodea nuttallii* wurde 1939 in Belgien erbracht, gut einhundert Jahre später als *Elodea canadensis*. Die schnelle Ausbreitung ist auf den regen Schiffsverkehr zurückzuführen, indem Pflanzenteile an Schiffen teils über sehr weite Strecken mitgetragen wurden. Auch verbreiteten sich die Pflanzen durch kleine Pflanzenteile, die durch Strömungen, als auch durch Wasservögel, weitergetragen wurden [Stuckey 1979]. Die Pflanzenteile konnten sich infolgedessen an neuen Orten gemäß ihrer Habitatsvorlieben wieder niederlassen. Das hiesige Klima, ähnlich dem ihres Ursprungsgebietes, trug stark zur Verbreitung bei. Dabei hat *Elodea* keine bestandsregulierenden Feinde hierzulande zu fürchten. *Elodea* zählt zu den invasiven Neophyten und wird mittlerweile auch in Europa als heimisch angesehen. Durch das Aufkommen von *Elodea* wurden andere Arten von Wasserpflanzen stark dezimiert oder gar ganz verdrängt, was ihr auch ihren Namen Wasserpest einbrachte [Hussner et al. 2010]. Mittlerweile ist *Elodea* in Afrika und Asien zu finden und bis nach Australien und Neuseeland vorgedrungen [Josefsson 2011]. Obwohl *Elodea* diözisch ist, wurden seit 1903 keine männlichen Pflanzen mehr dokumentiert [Cook und Urmi-König 1985]. Neben *Elodea* entwickelte sich zudem die verwandte Art *Egeria densa*, die neben den bereits erwähnten aus Nordamerika stammenden *Elodea*-Arten, in Südamerika verbreitete Dichtblättrige Wasserpest. Deren Verbreitung erstreckt sich über weite Teile Brasiliens, Chile und Argentinien [Nichols et al. 1986].



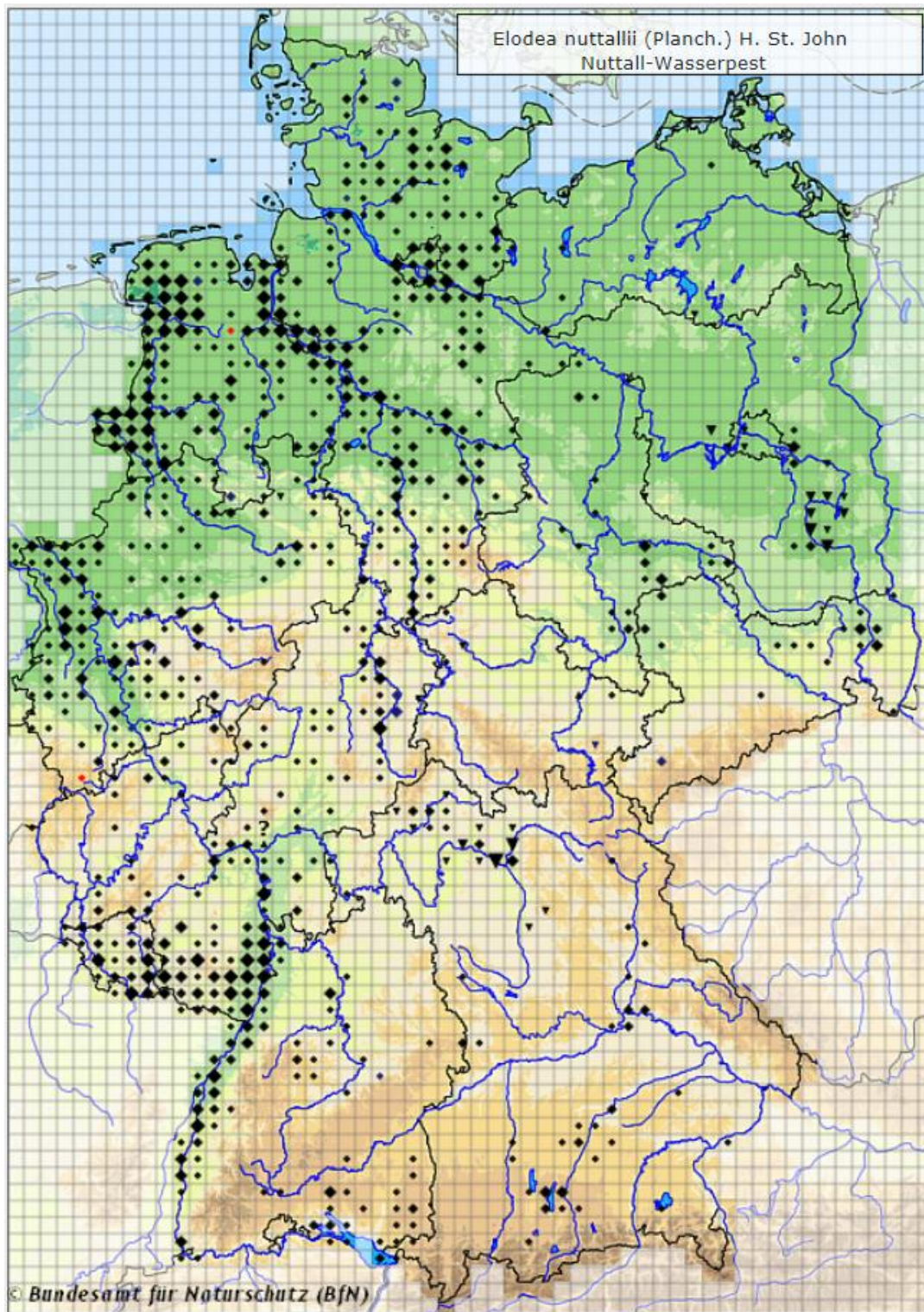


Abbildung 10: Verbreitung von *Elodea nuttallii* in Deutschland (Bundesamt für Naturschutz) [URL 9]

In Abbildung 10 ist die Ausbreitung von *Elodea nuttallii* in Deutschland durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) dokumentiert. Deutlich wird, dass die Ausbreitung

entlang der großen Flüsse verläuft. Während im Westen Deutschlands eine hohe Anzahl an dokumentierten Nachweisen zu sehen ist, ist im Osten *Elodea nuttallii* noch nicht so weit verbreitet, wenngleich sie auch dort mittlerweile vermehrt vorkommt.

#### 4.2.2 Morphologie

*Elodea nuttallii* ist eine submerse vaskuläre Wasserpflanze. Sie ist gekennzeichnet durch Triebe von durchschnittlich 30-100 cm Länge, die komplett unterhalb der Wasseroberfläche liegen. Diese können allerdings bis zu 4 Metern lang werden. Lediglich während der Blütezeit von Juni bis August, liegen ihre weißlich bis violetten Blüten auf der Wasseroberfläche auf. Ihre Blätter sind dunkelgrün und werden zwischen 6 und 13 mm lang. Dabei sind sie in Dreiergruppen, sogenannten Quirlen, auf dem gesamten Stängel verteilt. Die Blätter sind dabei nach unten zurückgebogen und häufig in sich verdreht. Weiterhin laufen ihre Spitzen lanzettförmig zu [Cook und Urmi-König 1985].

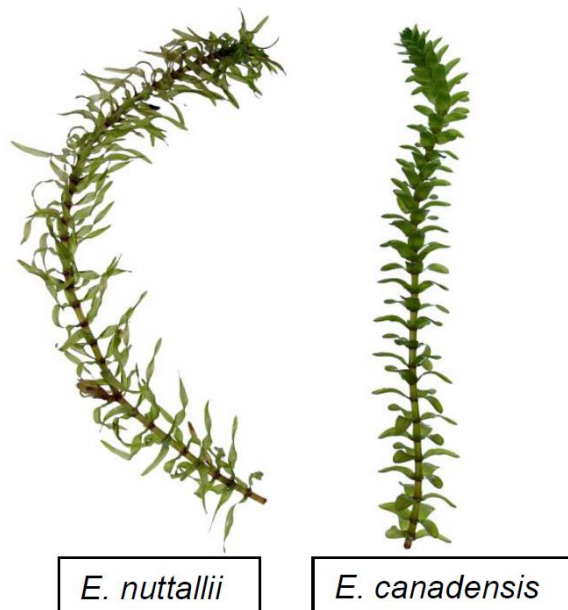


Abbildung 11: Stängel von *Elodea nuttallii* und *Elodea canadensis* [Weickardt 2015]



In Abbildung 11 sind Triebe der Arten *Elodea nuttallii* und *Elodea canadensis* zu sehen. Beide Arten bilden ihre Blätter am gesamten Sproß in Dreiergruppen aus. Auffällig ist jedoch, dass bei *E. nuttallii* die Blätter in sich verdreht sind und lanzettförmig zulaufen. *Elodea* bildet sehr große Bestände aus, die sich meist über das gesamte Flussbett erstrecken. Dabei verzweigen sich die Stängel nahe unterhalb der Wasseroberfläche [Bowmer et al. 1995]. Abbildung 12 zeigt dies anhand der Probenahmestelle am Fluss Parthe in Leipzig.



Abbildung 12: *Elodea nuttallii*-Bestand in der Parthe im Juni 2016

Im folgenden Kapitel wird das Habitat von *E. nuttallii* genauer betrachtet und es wird Aufschluss darüber gegeben, warum *Elodea* so häufig und weit verbreitet vorkommt.

### 4.2.3 Habitat

*Elodea* wurzelt im feinen Sediment, im schlammigen Untergrund des Flussbettes. Das Sediment sollte einen organischen Anteil von 10-25% aufweisen. Sie wächst in bis zu 12 Metern Tiefe in nährstoffreichen, flachen Süßwasserseen und langsam fließenden Flüssen. Bis zu einer Tiefe von 12 Metern kommt sie allerdings nur vor, sofern ihr hoher Lichtbedarf gedeckt ist. Dazu muss sie 15% des einfallenden Lichtes aufnehmen können [Nichols et al. 1986]. Dabei bevorzugt sie einen pH-Wert von 6,5-10 sowie eine Wassertemperatur von 10-25 °C [Cook und Urmi-Lönig 1985]. *Elodea* überwintert in Wassertemperaturen von 1-4 °C, selbst wenn die Temperaturen außerhalb des Wassers deutlich unter dem Nullpunkt liegen und der Fluss gefroren ist. Durch die hohe Lichtaufnahme verdrängt *Elodea* andere Arten sehr schnell aus ihrem Habitat. *Elodea nuttallii* verdrängt selbst *Elodea canadensis*, da sie ein schnelleres Wachstum aufweist und somit mehr Licht absorbieren kann. Durch das schnelle Wachstum und die langen Triebe bildet *Elodea* ein ideales Habitat für Fische, Krebstiere und andere Tiere.

## 5 Material

Nachfolgend sind die für die Analysen der Biomasse erforderlichen Chemikalien, Materialien und Geräte aufgeführt.

### 5.1 Chemikalien

- Acetanilid (Merck KGaA, Darmstadt), Produktnummer 100011
- Salpetersäure 65%, Suprapur® (Merck KGaA ,Darmstadt), Produktnummer: 100441
- Wasserstoffperoxid 30%, Suprapur® (Merck KGaA ,Darmstadt), Produktnummer: 107298
- Claritas PPT Kontrollstandard 21, 5 %  $\text{HNO}_3$  (SPEX Certiprep, Metuchen, NJ, USA)
- Certipur ICP Multi-Element Standard IV, 1000 mg/L in 10%-iger Salpetersäure (Merck KGaA, Darmstadt) Produktnummer: 111355
- Certipur ICP Multi-Element Standard XVI, 100 mg/L in 10%-iger Salpetersäure (Merck KGaA, Darmstadt), Produktnummer: 109487
- Dichlormethan (Merck KGaA, Darmstadt), Produktnummer: 106454
- Chlortrimethylsilan (Merck KGaA, Darmstadt), Produktnummer: 102333
- N,O-Bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamid, BSTFA (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, München), Produktnummer: 155195

## 5.2 Material

- Eppendorf- Reaktionsgefäße
- Glasschalen
- Keramik-Tiegel
- Mörser
- Zinn-Schiffchen
- Begasungsflaschen (Schott AG, Mainz)
- Filterpapier 388, Partikelretention 12-15 µm (Sartorius AG, Göttingen)
- Silicagel-Kartuschen

## 5.3 Geräte

- Waage ER-180A (A&D Weighing Europe GmbH, Darmstadt)
- Umlufttrockenschrank Function Line (Heraeus Instruments GmbH, Hanau)
- Trockenschrank UT6120 (Heraeus Instruments GmbH, Hanau)
- Ultra-Zentrifugalmühle ZM1 (Retsch GmbH, Haan)
- Überkopfschüttler GFL 3040 (GFL Gesellschaft für Labortechnik GmbH, Burgwedel)
- GC-MS-Einheit HP 5973B (Agilent Technologies GmbH, Böblingen)
- Muffelofen KL 05/12 (THERMCONCEPT Dr. Fischer GmbH & Co. KG, Bremen)
- Exsikkator (Duran Group GmbH, Mainz)



- Element-Analyzer Vario-EL III (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau)
- Multiwave PRO (Anton Paar GmbH, Graz, Österreich)
- Zentrifuge 5424 R (Eppendorf Deutschland GmbH, Wesseling-Berzdorf)
- Spectro Arcos ICP-OES (SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve)
- iCAP Q ICP-MS (Thermo Fisher Scientific GmbH, Bremen)

## 6 Methoden

Die im Folgenden beschriebenen Methoden wurden zur Analyse der Biomasse von *E. nuttallii* und *M. heterophyllum* angewandt. Während Probenahme (6.1), Bestimmung der Trockenmasse (6.2), Atomspektrometrie zur Nachweis der Metallbelastungen (6.5), sowie Extraktion (6.6) den Hauptteil der Versuche darstellt, wurden zusätzlich Glühverlust und Glührückstand (6.3), C, N, C/N-Verhältnis (6.4) für weitere, wöchentlich entnommene Proben von *E. nuttallii* aus der Parthe in Leipzig Schönefeld bestimmt. Diese Daten wurden im Verlauf des Hydrologischen Jahres 2015 für die Erstellung einer Korrelationsmatrix, einer sogenannten Heatmap verwendet (Abbildung...).

### 6.1 Probenahme

Die verwendeten Pflanzenproben wurden mithilfe eines Krauthakens aus dem Wasser entnommen. *M. heterophyllum* wurde aus dem Karl-Heine-Kanal in Leipzig Palgwitz entnommen (Datum der Probenahme: 08.06.2016). Die Proben für *E. nuttallii* wurden aus der Parthe in Leipzig Schönefeld entnommen (Datum der Probenahme: 17.05.2016). Zur Probenahme wurde ein an einer Schnur befestigter Krauthaken in das Gewässer geworfen und durch den Pflanzenbestand gezogen, somit konnten Pflanzen einschließlich ihrer Wurzeln entnommen werden. Anschließend wurden die Pflanzenproben grob von Schmutz und anderen Pflanzenarten befreit und für den Transport in einen Plastikeimer verpackt (siehe Anhang Abbildung 17). Neben den Pflanzenproben wurde weiterhin die Luft-, sowie die Wassertemperatur gemessen. Zusätzlich wurde die genaue Position der Probenahmestelle per GPS bestimmt. Im Labor wurden die Pflanzen sorgfältig unter Leitungswasser gewaschen und gesäubert. Schmutzpartikel, sowie Tiere und andere Pflanzenarten wurden entfernt, um nur die gewünschten Pflanzen für nachfolgende Analysen zu verwenden. Die gesäuberten Pflanzen wurden anschließend auf Cellulosepapier abgelegt, um überschüssiges Wasser abtropfen zu lassen. Aufgrund der geringen Trockenmasse

der Pflanzen und der für die Analysen benötigten Menge an Biomasse wurden insgesamt 1,250 kg *E. nuttallii* und 1,930 kg *M. heterophyllum* derart gesammelt und gewaschen. Die somit vorbereitete Pflanzenbiomasse konnte nun weiter verwendet und analysiert werden.

## 6.2 Bestimmung der Trockenmasse

Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden die abgetropften Pflanzenproben in mehrere Glasschalen gelegt. Aufgrund der Masse an Pflanzenmaterial wurden für *E. nuttallii* 11 und für *M. heterophyllum* 14 Glasschalen verwendet, wobei es sich um die gleiche Charge an Probenmaterial handelte. Die Schalen wurden sowohl ohne, als auch mit den Pflanzenproben gewogen, um die reine Pflanzenmasse zu erhalten. Nach dem Trocknen für 18 Stunden bei 70 °C im Trockenschrank wurden die Glasschalen mit den Pflanzen in einen Exsikkator gegeben, um unter Luftabschluss die Proben abkühlen zu lassen. Das Trocknungsmittel im Exsikkator entzieht der Luft die Feuchtigkeit. Dieser Schritt ist notwendig, da die Proben beim Erkalten aus der Luft Feuchtigkeit aufnehmen. Um die reine Trockenmasse zu bestimmen, ist dieser Schritt zwingend erforderlich. Nach dem Abkühlen der Proben wurden die Glasschalen erneut gewogen, um die Trockenmasse der Pflanzen zu erhalten (Tabelle 3).

Tabelle 3: Frisch- und Trockenmasse von *Elodea nuttallii*- und *Myriophyllum heterophyllum*-Proben

Glasschale	<i>E. nuttallii</i>		<i>M. heterophyllum</i>	
	Frisch	Trocken	Frisch	Trocken
1	105,3 g	6,1 g	100,8 g	5,8 g

2	103,0 g	5,6 g	134,5 g	9,5 g
3	123,4 g	6,5 g	114,3 g	8,8 g
4	111,6 g	5,7 g	138,7 g	9,6 g
5	102,6 g	5,6 g	97,6 g	7,2 g
6	108,8 g	6,0 g	104,8 g	6,6 g
7	105,2 g	5,6 g	130,0 g	8,9 g
8	116,8 g	6,5 g	135,6 g	10,0 g
9	114,4 g	6,3 g	161,7 g	12,2 g
10	135,4 g	7,5 g	138,5 g	10,1 g
11	131,4 g	6,5 g	190,4 g	15,1 g
12	-	-	212,2 g	16,3 g
13	-	-	138,6 g	10,0 g
14	-	-	133,0 g	9,7 g
Gesamt	1257,9 g	67,9 g	1930,7 g	139,8 g

### 6.3 Glühverlust und Glührückstand

Zur Bestimmung von Glühverlust und Glührückstand wurden die getrockneten Proben in einen Tiegel gegeben. Dieser wurde sowohl leer, als auch mit den Proben gewogen. Der Tiegel samt den Proben wurde bei 550°C zum Veraschen in einen Muffelofen gegeben. Nach dem Veraschen wurde der Tiegel abermals gewogen, um den Glührückstand, sowie den Glühverlust zu bestimmen. Dabei entspricht der Gewichtsverlust dem verbrannten organischen Anteil der Proben, dem Glühverlust. Die Asche, der Glührückstand, entspricht der Anorganik der Proben.

### 6.4 C, N, C/N-Verhältnis

Für die Bestimmung der Gehalte von C und N wurden die Pflanzenproben bei 950 °C im Element-Analyzer Vario-EL III verbrannt. Dazu wurden 5-10 mg fein gemahlene Pflanzenmaterial in Zinn-Schiffchen verpackt und dem Vario-EL III, der im Vorhinein mit Acetanilid geeicht wurde, zugeführt. Durch die Verbrennung in mit Sauerstoff hoch angereicherter Heliumatmosphäre entstehen als Oxidationsprodukte CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, sowie SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> und flüchtige Halogenverbindungen. Letztere wurden durch Silberwolle chemisch gebunden. Die Stickoxide werden in einem mit Cu gefüllten Reduktionsrohr bei 500 °C zu N<sub>2</sub> reduziert. Die Gasmischung aus He, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> gelangt in ein Trenn- und Messsystem, in dem die Komponenten gaschromatographisch mithilfe spezifischer Adsorptionssäulen getrennt werden. Die durch den Wärmeleitfähigkeitsdetektor gemessenen Gehalte wurden in mg/g ausgegeben. Dadurch wurden die Werte für C<sub>total</sub> und N<sub>total</sub> erhalten. Mithilfe dieser Werte konnte anschließend das C/N-Verhältnis  $C_{total}/N_{total}$  berechnet werden.

## 6.5 Atomspektrometrie zum Nachweis der Elemente

Für beide Spektrometrierverfahren (ICP-OES und ICP-MS), als auch die Gaschromatographische Analyse wurden die Proben gleichermaßen vorbereitet. Nachdem die Pflanzenproben für 18 Stunden bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet wurden, wurden sie anschließend im Exsikkator abgekühlt. Durch die Trocknungssubstanz des Exsikkators wurde verhindert, dass die Proben beim Abkühlen wieder Feuchtigkeit aus der Luft ziehen. Die getrockneten und abgekühlten Proben wurden nun mithilfe der Zentrifugalmühle fein zermahlen (siehe Bilder im Anhang). Anschließend wurden sie für die atomspektrometrische Analyse mithilfe der Multiwave Pro in Lösung gebracht. Dazu wurden je 0,5 g der Pflanzenprobe mithilfe der Waage ER-180A abgewogen und in ein Eppendorff-Reaktionsgefäß gegeben. Hinzu wurden 5 ml Salpetersäure sowie 0,5 ml Wasserstoffperoxid, jeweils in Suprapur-Qualität, gegeben. Die so hergestellten Lösungen des Pflanzenmaterials wurden anschließend von Raumtemperatur für 7 Minuten auf 60 °C erwärmt. Anschließend für 3 Minuten auf 100 °C und dann für 15 Minuten bei 180 °C inkubiert. Während dieser Inkubationszeit entstand ein grauweißer Niederschlag. Nach einer Abkühlphase auf Raumtemperatur (15 Minuten) wurde der Niederschlag mithilfe der Zentrifuge bei 14600 rpm und 5 Minuten abzentrifugiert. Das entstandene Pellet wurde verworfen, da es für die weitere Analyse nicht erforderlich war. Bevor die Messungen mithilfe der Spectro Arcos-, sowie der iCAP Q ICP-MS-Einheit durchgeführt wurden, wurden diese kalibriert und einem Performance-Test unterzogen. Zur Kalibrierung der Messeinheiten wurden von den jeweiligen Firmen mitgelieferte Kalibrierungsstandards verwendet. Diese wurden auch während der anschließenden Messungssequenz der Pflanzenprobelösungen periodisch gemessen, um die höchstmögliche Qualität der Messergebnisse zu gewährleisten. Des Weiteren wurden bei der Messung Kontrollstandards (Certipur ICP Multi-Element Standard IV und XVI bei ICP-OES, Certiprep Kontrollstandard 21 bei ICP-MS) mitgemessen. Aluminium, Bor, Calcium, Eisen, Kalium, Magnesium, Mangan, Phosphor, Schwefel und Zink wurden jeweils mit der Spectro Arcos-Einheit, also mit der ICP-OES gemessen. Die Spurenelemente Arsen, Cadmium, Cobalt, Chrom, Kupfer, Molybdän, Nickel und Blei wurden mithilfe der iCAP Q ICP-MS-Einheit gemessen. Um polyatomare Störungen bei der ICP-MS

zu vermeiden, wurde sie im KED-Modus durchgeführt. Als Kollisionszellen wurde Helium verwendet.

## 6.6 Extraktion

Für die gaschromatographische Analyse der organischen Inhaltsstoffe in *E. nuttallii* und *M. heterophyllum* musste ein Extrakt aus der Pflanzenbiomasse hergestellt werden. Dazu wurde das fein zermahlene Pflanzenmaterial in eine Begasungsflasche gegeben. Es wurden jeweils 50 g Pflanzenmaterial der jeweiligen Pflanze verwendet (siehe Anhang, Abbildungen 18 + 19). Anschließend wurde das Material mit Dichlormethan überschichtet. Dazu wurden jeweils 500 ml Dichlormethan verwendet. Um Oxidationen mit Luftsauerstoff während der Extraktion zu vermeiden, wurde der Gasraum beider Flaschen mit Stickstoff begast. Dazu wurden die Gefäße fest verschlossen und mithilfe einer Kanüle über den kleinen Hals der Flasche Stickstoff eingeleitet. Insgesamt wurde diese Begasung, mit dazugehörigem Spülen mit Stickstoff, über 1 Stunde und 30 Minuten durchgeführt. Die somit vorbereiteten Flaschen wurden anschließend in den Überkopfschüttler GFL 3040 eingespannt und bei 15 Umdrehungen pro Minute für 24 Stunden geschüttelt. Somit konnte gewährleistet werden, dass das gesamte Pflanzenmaterial mithilfe von Dichlormethan extrahiert wurde. Nach Ablauf der 24 Stunden wurden die Flaschen aus dem Überkopfschüttler genommen und der Extrakt konnte filtriert werden. Dazu wurden in kleine Schott-Glasflaschen Glastrichter gesetzt und mit einem groben Filterpapier (388, Satorius AG, Göttingen) versehen. Nun konnte der Extrakt nach und nach in den Filter gegeben werden (siehe Anhang, Abbildungen 20-24). Somit blieb in den Schott-Flaschen das reine Filtrat zurück. Von den anfänglichen 500 ml Dichlormethan und den 50 g Pflanzenmaterial verblieben nach der Filtration 300 ml Extrakt. Dieser Extrakt konnte für die GC-MS-Analyse weiterverwendet werden.

## 6.7 GC-MS-Analyse

Zur Analyse der Organik in den Pflanzenproben wurde ein GC-MS-System 5973 von Agilent Technologies Deutschland GmbH aus Böblingen verwendet. Zur Ionisation der einzelnen Stoffe wurde Ionenstoßionisation verwendet. Für die Auftrennung in der Trennsäule diente eine DB-1 Kapillarsäule (30m \* 0,25 mm \* 0,5 µm). Zur Vorbereitung der Proben wurden die beiden Extrakte von *Elodea* und *Myriophyllum* jeweils mit deuterierten Standard (5000 ppm Palmitinsäure-d<sub>2</sub> und 500 ppm Phenanthren-d<sub>10</sub>) versetzt. Anschließend wurden sie bei Raumtemperatur eingengt und über einer Silicagel-Kartusche gereinigt und derivatisiert. Zur Derivatisierung dienten Trimethylchlorsilan/Methanol zur Methylierung der Carboxylgruppen in Methylester und BSTFA (N,O-Bis(trimethylsilyl) trifluoracetamid) zur Silylierung, bei der die funktionellen OH-Gruppen in hydrophobe Trimethylsilylether umgewandelt werden. Die vorbereiteten Proben wurden mit einem Split/Splitless-Injektor (S/SL) in die Trennsäule eingeschleust. Der S/SL sorgte dabei für das unmittelbare Verdampfen und dem damit verbundenen Vermischen der Probe mit dem Trägergas. Als Trägergas wurde auch bei dieser Analyse Helium eingesetzt. Weiterhin wurde ein zuvor programmierter Temperaturmodus eingestellt. Nach einem zweiminütigen Inkubieren bei 40 °C wurde die Trennsäule anschließend mit 4°C/min auf 310°C aufgeheizt. Nach der Ionisierung mithilfe der Ionenstoßionisation konnten im Quadrupol-Massenspektrometer die einzelnen Analyten ermittelt und quantifiziert werden. Dies geschah mithilfe eines Computers in Echtzeit. Dazu wurden die drei am häufigsten vorkommenden Ionen eines Analyten erfasst und mit einem entsprechenden Standard verglichen. Die mittlere Standardabweichung lag bei dieser Analyse unter 20 %.



## 7 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen durch Atomspektrometrie (Tabelle 4) und GC-MS (Tabellen 5 + 6) dargestellt. Zusätzlich werden mit dem Programm R erstellte Graphen (Abbildungen 13 + 14) der Daten des hydrologischen Jahres 2015 dargestellt. Diese Graphen wurden mithilfe der Analysenergebnisse der wöchentlichen Beprobung von *E. nuttallii* aus der Parthe in Leipzig Schönefeld erstellt. Da bereits im August 2014 mit der Probenahme begonnen wurde, konnten für die Erstellung der Graphen die Daten vom 1. November 2014 bis zum 31. Oktober 2015 verwendet werden. Diese Graphen wurden mit aufgenommen, um tiefergehend diskutieren zu können.

Nachfolgende Abbildung 13 zeigt eine mit R erstellte Heatmap (Abbildung 13). Neben den Metallen wurden sowohl Trockensubstanz (TS), Glühverlust (GV), Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), als auch das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C N) sowie die Wassertemperatur (WT) mit einbezogen. Dabei sind alle Proben des Hydrologischen Jahres verwendet worden. Der Color Key gibt die Korrelation der jeweiligen Parameter an. Dabei zeigen die blauen Quadrate eine negative Korrelation zwischen den jeweiligen Parametern und die roten Quadrate eine positive Korrelation.

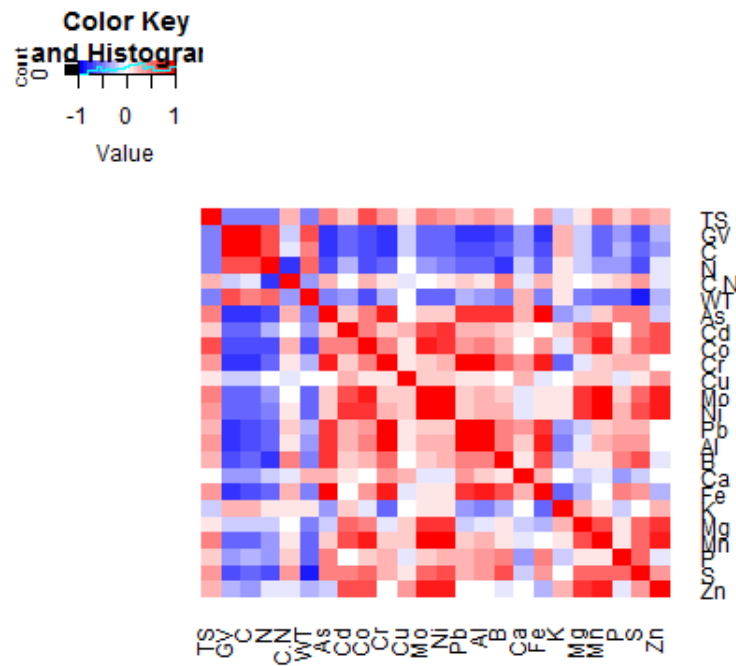


Abbildung 13: Heatmap, erstellt mit den Daten des Hydrologischen Jahres 2015

Für die nachfolgende Diskussion ist zu beachten, dass je stärker sich ein Parameter auf einen anderen auswirkt, die Intensität der Farbe sich ändert. Bei einem blauen Quadrat verhält es sich demnach so, dass sich ein Parameter negativ auf den anderen auswirkt. Ein rotes Quadrat hingegen zeigt eine positive Auswirkung eines Parameters auf den anderen.

Abbildung 14 zeigt ein Streudiagramm für die Organik im Zusammenhang mit der Wassertemperatur. Zusätzlich wurde eine Regressionslinie eingezeichnet, die den Trend des Datenverlaufs zeigt. Jeder Punkt steht für eine Probenahme innerhalb des Hydrologischen Jahres 2015.

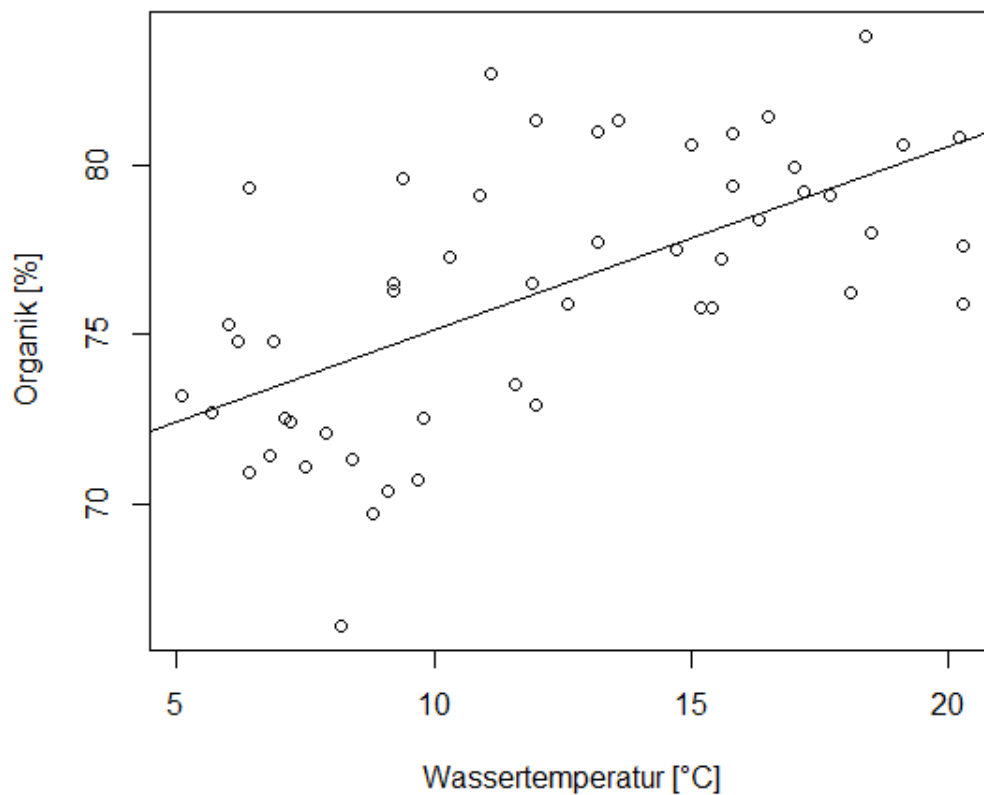


Abbildung 14: Streudiagramm der Organik [%] in Bezug auf die Wassertemperatur [°C]

In folgender Tabelle sind die Ergebnisse der Atomspektrometrie für *E. nuttallii* und *M. heterophyllum* aufgetragen (Tabelle 4). Zusätzlich zu den Konzentrationen der Metalle, die in ppm (mg/kg) dargestellt sind, ist auch die jeweilige Methode (ICP-OES oder ICP-MS) mit aufgeführt. Gerade für die Analyse von Spurenelementen eignet sich die ICP-MS sehr gut, um auch geringe Konzentrationen nachzuweisen. Dies ist in Tabelle auch deutlich zu erkennen, so ist für Cadmium bei *M. heterophyllum* lediglich eine Konzentration von 0,09 ppm aufgefunden worden.

Tabelle 4: Elementaranalyse für *Elodea nuttallii* und *Myriophyllum heterophyllum*

Element	Einheit	<i>E. nuttallii</i>	<i>M. heterophyllum</i>	Methode
As	mg/kg	1,64	3,22	ICP-MS
Cd	mg/kg	0,25	0,09	ICP-MS
Mo	mg/kg	0,32	0,46	ICP-MS
Pb	mg/kg	2,06	2,13	ICP-MS
Al	mg/kg	460	260	ICP-OES
B	mg/kg	14	33	ICP-OES
Ca	mg/kg	12860	43720	ICP-OES
Cr	mg/kg	7	<3,1	ICP-MS
Co	mg/kg	7	7	ICP-MS
Cu	mg/kg	15	10	ICP-MS
Fe	mg/kg	3850	410	ICP-OES
K	mg/kg	46690	23400	ICP-OES
Mg	mg/kg	1790	2920	ICP-OES

Mn	mg/kg	820	3410	ICP-OES
Ni	mg/kg	8	18	ICP-MS
P	mg/kg	6020	2840	ICP-OES
S	mg/kg	6510	5870	ICP-OES
Zn	mg/kg	150	570	ICP-OES

Nachfolgende Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der GC-MS-Analyse von *M. heterophyllum*. Dabei sind die charakteristischen Ionen des jeweiligen Stoffes mit angegeben, welche für die Identifikation wichtig sind. Des Weiteren ist die Konzentration der Stoffe in  $\mu\text{g/g}$  Trockensubstanz angegeben. Hinzu kommt die Prozentangabe, welchen Anteil die Stoffgruppen in der Gesamtheit der Pflanzen annehmen. Allerdings nur bei Stoffgruppen, die in signifikanten Mengen aufgefunden wurden.

Tabelle 5: Ergebnisse der GC-MS-Analyse von *Myriophyllum heterophyllum*

Identifikation (Kurzbezeichnung)	Charakteristische Ionen	C ( $\mu\text{g g}^{-1}$ TS)
n-Alkan C <sub>14</sub>	43/ <u>57</u> /71/198	50
Lauric acid (12:0)	<u>74</u> /87/143/214	70
Myristic acid (14:0)	<u>74</u> /87/143/242	1,225

Pentadecanoic acid (15:0)	<u>74</u> /87/143/256	90
Free phytol	73/ <u>143</u> /353/368 Underivat. <u>71</u> /123/278/296	Σ 1,760
Unsaturated acid (16:3)	55/67/ <u>79</u> /264	135
Unsaturated acid (16:2)	<u>43</u> /55/67/266	230
Palmitoleic acid (16:1ω7c)	41/ <u>55</u> /236/268	6,480 (8.2%)
Palmitic acid (16:0)	<u>74</u> /87/143/270	24,800 (31.3%)
OH-Unsaturated acid (16:3)	41/ <u>79</u> /337/352	145
C <sub>16</sub> -2-Tetrahydro-M-5-oxo-furancarboxylic acid	43/ <u>99</u> /295/310	170
Heptadecanoic acid (17:0)	<u>74</u> /87/143/284	130
Stearic acid (18:0)	<u>74</u> /87/143/298	645
Oleic acid (18:1ω9c)	41/ <u>55</u> /264/296	3,360 (4.2%)
Linoleic acid (18:2ω6c9c)	41/ <u>67</u> /82/294	7,680 (9.7%)
α-Linolenic acid (18:3ccc)	67/ <u>79</u> /95/292	32,800 (41.4%)
Unsaturated acid (20:5)	67/ <u>79</u> /91/287	155
Arachidonic acid (20:4)	67/ <u>79</u> /91/318	40
Arachic acid (20:0)	<u>74</u> /87/143/326	215
Behenic acid (22:0)	<u>74</u> /87/143/354	230
Tricosanoic acid (23:0)	<u>74</u> /87/143/368	75

Lignoceric acid (24:0)	<u>74/87/143/382</u>	410
Hexacosanoic acid (26:0)	<u>74/87/143/410</u>	70
Gesamtanteil Fettsäuren		7.8%
2-OH-Arachic acid	43/ <u>355</u> /399/414	30
2-OH-Behenic acid	43/ <u>383</u> /427/442	425
2-OH-Tricosanoic acid	43/ <u>397</u> /441/456	175
2-OH-Lignoceric acid	43/129/ <u>411</u> /455/470	1040
2-OH-Pentacosanoic acid	43/ <u>425</u> /469/484	185
2-OH-Hexacosanoic acid	43/ <u>439</u> /483/498	105
2-OH-Heptacosanoic acid	43/ <u>453</u> /497/512	30
Stigmastasterol (5,22-dien) Acetat	55/81/255/351/ <u>394</u>	185
β-Sitosterolacetate	43/55/255/381/ <u>396</u>	60
α-Tocopherol	57/237/277/ <u>502</u>	1680
M-Cholesta-dien-ol	<u>129/341/380/455/470</u>	265
Campesterol	129/343/382/ <u>472</u>	415
Stigmasterol	129/255/394/ <u>484</u>	3920
DM-5α-cholesta-7,25(27)-dien-3β-ol	145/255/394/429/ <u>484</u>	105
β-Sitosterol	129/357/396/ <u>486</u>	1320

$\beta$ -Amyrin	129/203/ <u>218</u> /498	1130
Gesamtanteil Sterole		0.91%

Nachfolgend sind die Ergebnisse, wie schon vorher für *Myriophyllum*, für *Elodea* aufgetragen (Tabelle 6). Auch hierbei sind die gefundenen Stoffe, die Konzentrationen selbiger, sowie die charakteristischen Ionen aufgeführt. Im Gegensatz zu *Myriophyllum* konnte aufgrund technischer Mängel allerdings kein Sterolmuster bestimmt werden, daher fehlt es in dieser Tabelle.

Tabelle 6: Ergebnisse der GC-MS-Analyse von *Elodea nuttallii*

Identifikation (Kurzbezeichnung)	Charakteristische Ionen	C ( $\mu\text{g g}^{-1}$ TS)
17.3 Caprylic acid (8:0)	<u>74</u> /87/127/158	150
20.8 9:1	<u>74</u> /96/138/170	210
24.5 Caprinic acid (10:0)	<u>74</u> /87/143/186	290
25.7 Trimethyl-TeH-Naphthalene (TeH: tetrahydro)	39/132/ <u>159</u> /174	145
Lauric acid (12:0)	<u>74</u> /87/143/214	410
Myristic acid (14:0)	<u>74</u> /87/143/242	1,100
Pentadecanoic acid (15:0)	<u>74</u> /87/143/256	270
Free phytol	73/ <u>143</u> /353/368 Underivat. <u>71</u> /123/278/296	$\Sigma$ 1,550



Palmitoleic acid (16:1 $\omega$ 7c)	41/ <u>55</u> /236/268	1,450
Palmitic acid (16:0)	<u>74</u> /87/143/270	21,500
C <sub>16</sub> -2-Tetrahydro-M-5-oxo-furancarboxylic acid?	43/ <u>99</u> /295/310	460
Heptadecanoic acid (17:0)	<u>74</u> /87/143/284	155
Stearic acid (18:0)	<u>74</u> /87/143/298	610
Oleic acid (18:1 $\omega$ 9c)	41/ <u>55</u> /264/296	1,750
Linoleic acid (18:2 $\omega$ 6c9c)	41/ <u>67</u> /82/294	9,300
$\alpha$ -Linolenic acid (18:3ccc)	67/ <u>79</u> /95/292	15,600
Nonadecanoic acid	<u>74</u> /87/269/312	145
Unsaturated acid (20:5)	67/ <u>79</u> /91/287	335
Unsaturated acid (20:3)	<u>55</u> /67/79/320	260
Unsaturated acid (20:2)	<u>55</u> /67/290/322	155
Arachic acid (20:0)	<u>74</u> /87/143/326	505
Heneicosanoic acid	<u>74</u> /87/143/340	180
Behenic acid (22:0)	<u>74</u> /87/143/354	770
Tricosanoic acid (23:0)	<u>74</u> /87/143/368	160
Lignoceric acid (24:0)	<u>74</u> /87/143/382	425
Hexacosanoic acid (26:0)	<u>74</u> /87/143/410	155
Octacosanoic acid	<u>74</u> /87/143/438	180

Tricontanoic acid	74/87/143/ <u>466</u>	75
Gesamtanteil Fettsäuren		5.7 %
31.6 Azelaic acid	<u>55</u> /74/152/185	270
34.6 Sebacic acid	<u>59</u> /74/125/199	210

## 8 Diskussion

Mithilfe der Atomspektrometrie wurden die Metalle in den *Elodea nuttallii*-Proben aus der Parthe analysiert. Selbst geringe Spuren konnten nachgewiesen werden. Da die ICP-MS eine sehr geringe Nachweisgrenze aufweist, konnten mit ihrer Hilfe auch Spurenelemente in sehr geringen Mengen nachgewiesen werden (Tabelle 4). Als Beispiel sind hier Kadmium und Molybdän anzuführen, dessen Werte sich unterhalb von 1 ppm bewegen. Deutlich wurde bei der Analyse, dass sowohl Kalium, als auch Calcium in sehr hohen Mengen in den Proben vorkommen. Kalium, als auch Calcium, werden von submersen Pflanzen bevorzugt angereichert und eingelagert, besonders in den Blättern [Stiles 1946]. Während der Wert von Kalium bei *Elodea* etwa doppelt so hoch war als bei *Myriophyllum* (46690 ppm zu 23400 ppm), war er für Calcium bei *Myriophyllum* deutlich höher (43720 ppm zu 12860 ppm). Weitere recht hohe Werte konnten für Phosphor und Schwefel ermittelt werden. Mangan scheint von *Myriophyllum* besser akkumuliert werden als von *Elodea*, allerdings kann dies auch an den verschiedenen Gewässern der Probenahme liegen. Hier anzuführen ist auch die Eisenbelastung, die bei *Elodea* deutlich höher ist. Diese erhöhte Akkumulation von Eisen steht im Zusammenhang mit der im Januar und Februar auftretenden Eisentrübung der Parthe und der hohen Akkumulationsrate von Wasserpflanzen für Eisen [Marx 2016]. Die weiteren Metalle sind bei den *Elodea*-Proben nicht in sonderlich hohen Mengen aufgefunden worden, allerdings werden diese Metalle vorrangig in den frühen Monaten des Jahres, insbesondere Januar, Februar und März akkumuliert, da sie durch das Schmelzwasser aus den Gebirgen in die Gewässer gelangen. Dies kann auch anhand der Heatmap (Abbildung 13) belegt werden, die eine negative Korrelation zwischen Wassertemperatur und Schwermetallkonzentration aufzeigt. Dies bedeutet, dass mit zunehmender Wassertemperatur die Konzentration der Metalle in der Biomasse sinkt. Anhand der Wassertemperatur lässt sich weiterhin gut erkennen, dass sie direkten Einfluss auf die Biomasse von *E. nuttallii* hat. So ist zu sehen, dass die Wassertemperatur positiv mit der Organik (GV), sowie Kohlenstoff und Stickstoff korreliert. Da die steigende

Wassertemperatur mit vermehrtem Sonnenschein und somit gesteigerten Lichtverhältnissen einhergeht, produziert die Pflanze mehr Biomasse und wächst. Für das Wachstum braucht sie Kohlenstoff und Stickstoff, dies führt zur Erhöhung des Organik-Anteils in den Pflanzen (siehe Abbildung 14). Aus diesem Grund korreliert die Organik auch negativ mit der Trockensubstanz. Anhand der Heatmap (Abbildung 13) ist auch deutlich abzulesen, dass die Trockensubstanz positiv mit den Metallen korreliert. Im Gegenzug korreliert die Organik natürlich negativ mit den Metallen.

Bei der Analyse der organischen Inhaltsstoffe in *Myriophyllum* (Tabelle 5) fällt auf, dass das Fettsäureprofil durch eine charakteristische *even-over-odd*-Prävalenz gekennzeichnet ist. Diese Prävalenz sagt aus, dass geradkettige Fettsäuren gegenüber ungeradkettigen dominant aufgefunden werden [Kuhn et al. 2009]. Genau wie das Fehlen von für Bakterien signifikanter Fettsäuren konnten erwartungsgemäß keine, oder nur in sehr geringer Konzentration, ungeradkettige Fettsäuren nachgewiesen werden. Die häufigsten in den *Myriophyllum*-Proben aufgefundenen Fettsäuren waren  $\alpha$ -Linolensäure, gefolgt von Palmitinsäure. Bei einem Fettsäureanteil von insgesamt 7,8 % in *Myriophyllum* sind alleine 3,2 % durch  $\alpha$ -Linolensäure gekennzeichnet. Diese ist polyungesättigt und ist besonders ernährungsphysiologisch wertvoll. Weitere 0,8 % der Biomasse-Trockensubstanz werden von Linolsäure ausgemacht, einer ebenfalls ernährungstechnisch begehrten Fettsäure. Das ausgeprägte Muster an polyungesättigten Fettsäuren ist für aquatische Pflanzenbiomasse, anders als für terrestrische Pflanzenbiomasse, typisch. Dabei ist jedoch die Gesamtkonzentration dieser polyungesättigten Fettsäuren sehr gering. So ist diese Konzentration in Algen deutlich höher, als in vaskulären Wasserpflanzen wie *Elodea nuttallii* oder *Myriophyllum heterophyllum* [Khotimchenko et al. 2002]. Auffällig ist zudem die hohe Konzentration an Phytosterolen, die positive gesundheitliche Wirkungen aufweisen. Neben  $\alpha$ -Tocopherol und  $\beta$ -Amyrin sind vor allem Stigmasterol und  $\beta$ -Sitosterol zu nennen, die auch am abundantesten sind. Vertreter von  $4\alpha$ -Sterolen, wie in *M. verticillatum* [Della Grace et al. 1989] konnten nicht identifiziert werden, ihre Anwesenheit ist aber durchaus möglich. Mithilfe konventioneller Massenspektren ist die Identifikation weiterer Sterole nicht, oder nur sehr schwer, möglich. Um eine genauere Analyse im Hinblick auf die enthaltenen Sterole gilt es, ent-

sprechende Standards zu verwenden. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Sterolkonzentration in *Myriophyllum heterophyllum* noch höher ist, als in Tabelle 5 dokumentiert. Durch die in dieser Arbeit angewandte Methodik (Extraktion der Biomasse, Veresterung und Silylierung) werden nur freie Sterole quantitativ bestimmt. Unklar ist hingegen, inwieweit die meist über Ether- und Esterbindungen an Glykoside oder Säuren gebundenen Sterole isoliert werden. Gleiches gilt für Phytol, in der Tabelle ist nur die Konzentration des freien Phytols angegeben. Um weitere Daten im Hinblick auf die gebundenen Vertreter der Sterole und Phytole zu finden, wäre eine milde alkalische Verseifung sinnvoll, mithilfe dieser das im Chlorophyll gebundene Phytol freigesetzt werden kann. Durch eine Verseifung können auch weitere aus Wachsestern stammende Alkanole aufgefunden werden. Für *Myriophyllum aquaticum* konnten schon Werte von 0,6 % bezogen auf die Trockensubstanz aufgefunden werden [Amaral et al. 1990].

Der Fettsäure-Anteil in *Elodea*-Biomasse ist mit 5,7 % gegenüber 7,8 % geringer als der von *Myriophyllum*. Eine Gemeinsamkeit beider Pflanzen besteht in der Dominanz geradkettiger Fettsäuren, was charakteristisch für pflanzliche Biomassen ist. In *Elodea* ist jedoch Palmitinsäure, anders als bei *Myriophyllum*, abundanter als  $\alpha$ -Linolensäure. Allerdings treten bei *Elodea* die Vertreter jenseits  $C_{22}$  in höherer Konzentration auf, was auf einen terrestrischen Ursprung der Pflanze hinweist. Ein weiteres Indiz hierfür ist das Fehlen von für aquatische Biomasse typische Vertreter wie 16:2 (Hexadecadiensäure), 16:3 (Hexadecatriensäure) und 16:4 (Hexadecatetraensäure). Es treten jedoch polyungesättigte  $C_{20}$ -Vertreter auf. In den *Elodea*-Proben wurden auch Spuren von Bisphenol A (BPA), jedoch keine Phenole, Pestizide oder Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) nachgewiesen. Die Anwesenheit von BPA muss im Folgenden allerdings noch abgesichert und tiefergehend betrachtet werden. Weiterhin gilt es, die Wasserqualität im Karl-Heine-Kanal und auch in der Parthe, den Orten der Probenahme, zu untersuchen. Das BPA gefunden wurde, jedoch keine Phenole, Pestizide oder PAKs vorhanden sind, kann auf zwei Ursachen hindeuten. Zum einen ist das aquatische Milieu in besagten Flüssen wenig belastet, oder die Pflanzen weisen ein geringes Sorptionsvermögen in Bezug auf diese Stoffe auf.

Sowohl *Elodea*, als auch *Myriophyllum* weisen Stoffe, insbesondere Linolsäure oder  $\alpha$ -Linolensäure, auf, die für eine weitere Verwendung durchaus vorteilhaft wären. Auch der Anteil an Sterolen stellt eine Nutzungsmöglichkeit der Biomasse dar. Wie schon erwähnt, sind die Konzentrationen, unter anderen  $\beta$ -Sitosterol, geringer als in anderen Pflanzen [Muñoz Escobar et al. 2011]. Jedoch kann man aquatische Wasserpflanzen als innovativen Rohstoff bezeichnen, da sie weder bewusst angepflanzt, noch arbeitsintensiv kultiviert werden müssen. Die Biomasse fällt Jahr für Jahr an, ohne einem effektivem Nutzen zugeführt zu werden. Anhand der Ergebnisse lässt sich jedoch belegen, dass interessante Inhaltsstoffe vorhanden sind. Nun gilt es, diese Ergebnisse weiter zu vertiefen, mehr Daten zu generieren und intensiver nach Inhaltsstoffen in *Elodea* und *Myriophyllum* zu suchen. Dabei sollte auch in Betracht gezogen werden, nur auf bestimmte Stoffgruppen abzielen, um die Methodik dahingehend zu optimieren. Auch bei der Vorbereitung und Aufreinigung der Biomasse lassen sich weitere Schritte optimieren. Da durch den hohen Anteil an Chlorophyll oftmals Kontaminationen auftreten, gilt es hier, möglichst das gesamte Chlorophyll aus den Extrakten zu entfernen.

Bei dieser Arbeit konnten keine Sterolmuster in *Elodea*-Biomasse bestimmt werden, da das Tuning der GC-MS ausgefallen ist und somit keine weitere Analyse möglich war. Dies lag vermutlich an den *dirty samples*, die Extrakte waren noch zu stark mit Chlorophyll belastet. Auch die Wahl des Lösungsmittels trägt dazu bei, Inhaltsstoffe besser zu extrahieren, beziehungsweise zu lösen. Das in dieser Arbeit verwendete Dichlormethan ist sehr gut dazu geeignet, hydrophobe, oftmals langkettige, Moleküle mit funktionellen Gruppen zu extrahieren. Andere Lösungsmittel, wie n-Pentan, aber auch Cyclohexan und Aceton sind für Lipidextraktionen zudem weniger geeignet. In diesem speziellen Fall der Extraktion aus aquatischer Biomasse, ist die Verwendung polarer Lösungsmittel generell wenig sinnvoll. Wasserpflanzen weisen hohe Anteile an Neutrallipiden und Glykolipiden auf, der Phospholipid-Anteil liegt gewöhnlich bei maximal 10 % [Fogg 1973]. Aus diesem Grund wurde in diesem Fall Dichlormethan als Lösungsmittel gewählt. Auch wegen dem, im Gegensatz zu Chloroform, niedrigerem Siedepunkt, wurde Dichlormethan der Vorzug gegeben, um eventuelle leichtflüchtige Analyten mit höherer Wiederfindung zu gewinnen.

## 9 Zusammenfassung

Mithilfe der Analyse der anorganischen und organischen Inhaltsstoffe in *Elodea nuttallii* und *Myriophyllum heterophyllum* konnten Stoffe (unter anderen Linolsäure,  $\alpha$ -Linolensäure und  $\beta$ -sitosterol) identifiziert und auch quantifiziert werden. Gerade die GC-MS-Analyse zeigte interessante Inhaltsstoffe in den Pflanzen. Mit  $\beta$ -Sitosterol und anderen Sterolen, aber auch dem hohen Anteil an Linolsäure oder  $\alpha$ -Linolensäure kann die Biomasse weiterführend als Rohstoff für Pharma- oder Ernährungsindustrie genutzt werden, auch im Hinblick als Stofflieferant. Vor allem die Elementaranalyse bestätigt, dass die Pflanzen besonders im Sommer weniger stark mit Schwermetallen belastet sind, sodass während der Krautungszeit keine erhöhten Konzentrationen vorzufinden sind. Das Vorkommen von Sterolen muss im Hinblick auf die pharmazeutische Verwendung noch genauer betrachtet werden. Ernährungsphysiologisch sind die Pflanzen durch die hohen Konzentrationen an polyungesättigten Fettsäuren auch interessant. Festzuhalten ist, dass die beiden Pflanzenarten, *E. nuttallii* und *M. heterophyllum* durchaus Potential als Rohstoff haben. Durch die aufgezeigten breiten Verwendungsmöglichkeiten besteht auf jeden Fall die Möglichkeit, diese Pflanzen in einer effektiven Form zu nutzen.

## 10 Ausblick

Wie schon im Vorhinein erwähnt, dienen die vorgestellten Daten und Ergebnisse als Grundlage für weitere Untersuchungen. Vor allem die pharmazeutische und ernährungstechnische Verwendung sollte dabei im Vordergrund stehen. Da diese Arbeit nicht gezielt auf einzelne Stoffe oder Stoffgruppen eingegangen ist, sollte dies bei weiteren Versuchen und Analysen fokussiert werden. Des Weiteren sollten die Krautungsmaßnahmen, sowie Transport- und Entsorgungswege optimiert werden, um die aquatische Biomasse als Rohstoff nutzen zu können und die Nutzung wirtschaftlicher, ökonomischer und ökologischer zu gestalten. Die mit dieser Arbeit begonnenen Versuche gilt es, weiter zu verfolgen und die Pflanzen weiter zu untersuchen. Da sowohl *Elodea* als auch *Myriophyllum* weltweit immer häufiger vorkommen und sich immer schneller ausbreiten, ist das Auffinden weiterer interessanter Inhaltsstoffe sehr spannend.



## Literatur

Aiken, S. G.; Newroth, P. R.; Wile, I. (1979): *The biology of canadian weeds*. 34. *Myriophyllum spicatum* L.. Canadian Journal of Plant Science. 59: 201-215

Amaral, M.; Da Silva, A.; Salatino, A. (1990): *Alkanes of surface waxes from eight species of aquatic angiosperms*. Aquatic Botany. 36(3): 281-286

Avault Jr., J. W. (1965): *Preliminary studies with grass carp for aquatic weed control*. The Progressive Fish-Culturist. 27(4): 207-209

Bartholomé, E.; Ullmann, F.; Biekert, E.; Hellmann, H.; Weise, E.; Kelker, V. H. (1980): *Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. Band 5: Analysen- und Meßverfahren*. 4. Auflage. Verlag Chemie. Weinheim. 118 ff.

Bartle, K.D.; Myers, P. (2002): *History of gas chromatography*. Trends in Analytical Chemistry. 21(9/10): 547-557

Barrat-Segretain, M. H.; Cellot, B. (2007): *Response of invasive macrophyte species to drawdown: the case of Elodea sp.*. Aquatic Botany. 87(4): 255-261

Bax, N.; Williamson, A.; Aguero, M.; Gonzalez, E.; Geeves, W. (2003): *Marine invasive alien species: a threat to global biodiversity*. Marine Policy. 27(4): 313-323

Blossey, B.; Nötzold, R. (1995): *Evolution of increased competitive ability in invasive nonindigenous plants: a hypothesis*. Journal of Ecology. 83(5): 887-889

Bowmer, K. H.; Jacobs, S.; Sainty, G. (1995): *Identification, biology and management of Elodea Canadensis, Hydrocharitaceae*. Journal of Aquatic Plant Management. 33: 13-19

Bowmer, K. H.; Smith, G. H. (1984): *Herbicides for injection into flowing water: acrolein and endothal-amine*. Weed Research. 24(3): 201-211

Boyd, C.E. (1968): *Fresh-water plants: a Potential Source of Protein*. Economic Botany. 22 (4):359-368

- Bundesamt für Naturschutz (2009): *Rote Liste der im Süßwasser reproduzierenden Neunaugen und Fische*. Naturschutz und Biologische Vielfalt. 70(1): 291-316
- Casper, S. J.; Krausch, H. D. (1980): *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Pteridophyta und Anthophyta, 1. Teil*. Band 23. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 403 S.
- Casper, S. J.; Krausch, H. D. (1981): *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Pteridophyta und Anthophyta, 2. Teil*. Band 24. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 532 S.
- Champion, P. D.; Clayton, J. S.; Hofstra, D. E. (2010): *Nipping aquatic plant invasion in the bud: weed risk assessment and the trade*. Hydrobiologia. 656: 167-172
- Cook, C.; Urmi-König, K. (1985): *A revision of the genus Elodea (Hydrocharitaceae)*. Aquatic Botany. 21: 111-156
- Cross, D. G. (1969): *Aquatic weed control using grass carp*. Journal of Fish Biology. 1: 27-30
- Dehnen-Schmutz, K.; Touza, J.; Perrings, C.; Williamson, M. (2007): *A century of the ornamental plant trade and its impact on invasion success*. Diversity and Distribution. 13: 527-534
- Dextrase, A. J.; Mandrak, N. E. (2006): *Impacts of alien invasive species on freshwater fauna at risk in Canada*. Biological Invasions. 8(1): 13-24
- Dibble, E. D.; Kovalenko, K. (2009): *Ecological impact of grass carp: a review of the available data*. Journal of Aquatic Plant Management. 47: 1-15
- Elger, A.; Willby, N. J. (2003): *Leaf dry matter content as an integrative expression of plant palatability: the case of freshwater macrophytes*. Functional Ecology. 17: 58-65
- Engmann, P. (1919): *Dresden, Wasserrose. Versammlung vom 31.Mai*. Blätter für Aquarien- und Terrarienkunde. 30: 183-184
- Fogg, G. E. (1973): *Phosphorus in primary aquatic plants*. Water Research. 7(1-2): 77-91

- García-Álvarez, A.; Van Leeuwen, C. H. A.; Luque, C. J.; Hussner, A.; Vélez-Martín, A.; Pérez-Vásquez, A.; Green, A. J.; Castellanos, E. M. (2015): *Internal transport of alien and native plants by geese and ducks: an experimental study*. *Freshwater Biology*. 60: 1316-1329
- Glomski, L. A. M.; Skogerboe, J. G.; Getsinger, K. D. (2005): *Comparative efficacy of diquat for control of two members of the hydrocharitaceae: Elodea and Hydrilla*. *Journal of Aquatic Plant Management*. 43: 103-105
- Halstead, J. M.; Michaud, J.; Hallas-Burt, S.; Gibbs, J. P. (2003): *Hedonic analysis of effects of a nonnative invader (Myriophyllum heterophyllum) on New Hampshire (USA) lakefront properties*. *Environmental Management*. 32: 391-398
- Heger, T.; Trepl, L. (2003): *Predicting biological invasions*. *Biological Invasions*. 5: 313-321
- Hoffmann, M. A.; González, A. B.; Raeder, U.; Melzer, A. (2013): *Experimental weed control of Najas marina spp. Intermedia and Elodea nuttallii in lakes using biodegradable jute matting*. *Journal of Limnology*. 72(3): 485-493
- Hofstra, D. E.; Clayton, J. S. (2001): *Evaluation of selected herbicides for the control of exotic submerged weed in New Zealand: I. The use of Endothall, Triclopyr and Dichlobenil*. *Journal of Aquatic Plant Management*. 39: 20-24
- Howard-Williams, C.; Schwarz, A. M.; Reid, V. (1996): *Patterns of aquatic weed regrowth following mechanical harvesting in New Zealand hydro-lakes*. *Hydrobiologia*. 340(1-3): 229-234
- Hussner, A.; van de Weyer, K.; Gross, E. M.; Hilt, S. (2010): *Eine Übersicht über die aquatischen Neophyten in Deutschland – Etablierung, Auswirkungen und Managementperspektiven*. *Handbuch Angewandte Limnologie*. 1. Auflage: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim
- IUCN International Union for the Conservation of Nature (2000): *Guidelines for the prevention of biodiversity loss due to biological invasions*. IUCN Council (<http://www.iucn.org/>). Gland, Schweiz

- James, W. F. (2008): *Effects of lime-induced inorganic carbon reduction on the growth of three aquatic macrophyte species*. Aquatic Botany. 88(2): 99-104
- Josefsson, M. (2011): *NOBANIS – Invasive species fact sheet – Elodea Canadensis, Elodea nuttallii and Elodea callitrichoides*. Online Database of the European Network of Invasive Alien Species. Date of access 30.07.2016
- Johnstone, L. M.; Coffey, B. T.; Howard-Williams, C. (1985): *The role of recreational boat traffic in interlake dispersal of macrophytes: a New Zealand case study*. Journal of Environmental Management. 20: 263-279
- Keane, R. M.; Crawley, M. J. (2002): *Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis*. Trends in Ecology & Evolution. 17(4): 164-170
- Khotimchenko, S. V.; Vaskovsky, V. E.; Titlyanova, T. V. (2002): *Fatty acids of marine algae from the pacific coast of North Carolina*. Botanica Marina. 45: 17-22
- Klingenstein, F.; Kornacker, P. M.; Martens, H.; Schippmann, U. (2005): *Gebietsfremde Arten – Positionspapier des Bundesamtes für Naturschutz*. Bundesamt für Naturschutz. Skript 128. Bonn – Bad Godesberg.
- Kuhn, T.; Krull, E.; Bowater, A.; Grice, K.; Gleixner, G. (2009): *The occurrence of short chain n-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils*. Organic Geochemistry. 41(2): 88-95
- Mack, R. N.; Simberloff, D.; Lonsdale, W. M.; Evans, H.; Clout, M.; Bazzaz, F. A. (2000): *Biotic invasions: causes, epidemiology, global consequences and control*. Ecological Applications. 10(3): 689-710
- Marx, L. (2016): *Analyse der anorganischen Inhaltsstoffe von Wasserpflanzen unter besonderer Berücksichtigung von Elodea nuttallii*. Praxisarbeit 6. Semester, Hochschule Mittweida
- Muñoz Escobar, M.; Voyevoda, M.; Fühner, C.; Zehnsdorf, A. (2011): *Potential uses of Elodea nuttallii-harvested biomass*. Springer. Heidelberg. Energy, Sustainability and Society. 1: 4

National Research Council (2002): *Making aquatic weeds useful: some perspectives for the developing countries*. 1. Auflage. Books for Business. Oakville, Canada. pp.: 83-90

Nichols, S. A.; Shaw, B. H. (1986): *Ecological life histories of the three aquatic nuisance plants, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton crispus* and *Elodea canadensis**. Hydrobiologia. 131(1): 3-21

Nichols, S. A. (1991): *The interaction between biology and the management of aquatic macrophytes*. Aquatic Botany. 41: 225-252

Nurminen, L.; Horppila, J.; Lappalainen, J.; Malinen, T. (2003): *Implications of rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) herbivory on submerged macrophyte in a shallow eutrophic lake*. Hydrobiologia. 506(1): 511-518

Pörschmann, J.; Weiner, B.; Wedwitschka, H.; Zehnsdorf, A.; Köhler, R.; Kopinke, F. D. (2015): *Characterization of biochars and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of *Elodea nuttallii**. Bioresource Technology. 189: 145-153

Podraza, P.; Brinkmann, T.; Evers, P. (2008): *Untersuchungen zur Massenentwicklung von Wasserpflanzen in den Ruhrstauseen und Gegenmaßnahmen, 364. Final report of the R&D project commissioned by the ministry for the environment and conservation, agriculture and consumer protection of the state of North Rhine-Westphalia (MUNLV)*. Essen

Rejmanek, M.; Richardson, D. M. (1996): *What attributes make some plant species more invasive?*. Ecology. 77(6): 1661-1665

Richardson, D. M.; Pyšek, P.; Rejmanek, M.; Barbour, M. G.; Panetta, F. D.; West, C. J. (2000): *Neutralization and invasion of alien plants: concepts and definitions*. Diversity and Distributions. 6: 93-107

- Rönicke, H.; Angelstein, S.; Schultze, M.; Geller, W. (2005): *Invasion submerser Makrophyten im Tagebausee Goitzsche*. Tagungsbericht 2005 der Deutschen Gesellschaft für Limnologie (DGL). Karlsruhe. 139-143
- Sheppard, A. W.; Shaw, R. H.; Sforza, R. (2006): *Top 20 environmental weeds for classical biological control in Europe: a review of opportunities, regulations and other barriers to adoption*. Weed Research. 46: 93-117
- Simberloff, D.; Gibbons, L. (2004): *Now you see them, now you don't! – population crashes of established introduced species* Biological Invasions. 6: 161-172
- Spangehl, B.; Scharrenberg, U. (1985): *Das Wechselblättrige Tausendblatt (Myriophyllum heterophyllum Michaux) im Heider Bergsee bei Brühl (Erftkreis, NRW)*. Floristische Rundbriefe. 2: 98-101
- Stiles, Walter (1946): *Trace elements in plants and animals*. 1. Auflage: The Macmillan Company: pp 26-50
- Stricker, W. (1962): *Das Leipziger Hafengelände – Einwanderungsort seltener und fremder Pflanzenarten*. Sächsisches Heimatblatt. 8: 464-473
- Stuckey, R. L. (1979): *Distributional history of Potamogeton Crispus (curly pondweed) in north america*. Bartonica, Philadelphia Botanical Club. 46: 22-42
- Sukopp, H. (2001): *Neophyten*. Bauhinia. 15: 19-37
- Thum, R. A.; Lennon, J. T. (2010): *Comparative ecological niche models predict the invasive spread of variable-leaf milfoil (Myriophyllum heterophyllum) and its potential impact on closely related native species*. Biological Invasions. 12: 133-143
- U.S. Congress (1993): *Harmful nonindigenous species in the United States*. Office of Technology Assessment, OTA-F-565. U.S. Congress Government Printing Office. Washington, D.C.
- van Donk, E.; Otte, A. (1996): *Effects of grazing by fish and waterfowl on the biomass and species composition of submerged macrophytes*. Hydrobiologia. 340: 285-290

van de Weyer, K.; Hussner, A. (2008): *Die aquatischen Neophyten (Gefäßpflanzen, Armleuchteralgen und Moose) Deutschlands – eine Übersicht*. Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL). Zusammenfassung der Jahrestagung 2007. Werder

Vitousek, P. M.; Mooney, H. A.; Lubchenco, J.; Melillo, J. M. (1997): *Human domination of earth's ecosystems*. Science. 277: 494-499

Weickardt, I. (2015): *Molekulargenetische Untersuchungen zur Verwandtschaft von Elodea nuttallii-Pflanzen unterschiedlicher Herkunft*. Praxisprojekt 3. Semester, Staatliche Studienakademie Riesa

White, J. (1979): *The plant as a metapopulation*. Annual Review of Ecology and Systematics. 10: 109-145

Zehnsdorf, A.; Korn, U.; Pröter, J.; Naumann, D.; Seirig, M.; Röncke, H.; Pieper, B. (2011): *Western waterweed (Elodea nuttallii) as a co-substrate for biogas plants*. Landtechnik. 66(2): 136-139

Zehnsdorf, A.; Hussner, A.; Eismann, F.; Röncke, H.; Melzer, A. (2015): *Management options of invasive Elodea nuttallii and Elodea canadensis*. Limnologica. 51: 110-117

URL 1: A bugly life – Entomology, Ecology, Evolution. *The enemy release hypothesis*. (10.07.2016)

URL: <https://egundalai.wordpress.com/2013/01/31/the-enemy-release-hypothesis/>

URL 2: Umweltforschungszentrum UFZ Leipzig. *AquaMak – Forschungsprojekt*. (15.07.2016)

URL: <http://www.ufz.de/index.php?de=37400>

URL 3: Gewässerwart Blog – Der Blog für Gewässerwarte von Gewässerwarten. *Folgen von Graskarpfen-Besatz* (22.07.2016)

URL: <http://gewaesserwart.de/folgen-von-graskarpfen-besatz/>

URL 4; C-Met. RoHS Division; M. Ramanaji; *ICP-OES – Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometer* (20.07.2016)

URL: <http://www.rohs-cmet.in/content/icp-oes>

URL 5: Stummeyer, J.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). *ICP-(Optische) Emissionsspektrometrie (ICP-OES)* (20.07.2016)

URL: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG\\_Geochem\\_anorg/Tech\\_Ausstattung/ICP\\_Optische\\_Emissionsspektrometrie/icp\\_oes\\_mtd.html?nn=1553798](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geochem_anorg/Tech_Ausstattung/ICP_Optische_Emissionsspektrometrie/icp_oes_mtd.html?nn=1553798)

URL 6: Institut für Mineralogie und mineralische Rohstoffe, TU Clausthal; *Was ist ICP-MS?* (28.07.2016)

URL: <http://www.icp-ms.de/wasist.html>

URL 7: Tröppner, O.; SKZ Das Kunststoff-Zentrum. *Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS)*. (28.07.2016)

URL: [http://www.skz.de/de/forschung/technischeausstattung1/pruefverfahren/spektroskopie/4498.Gaschromatographie\\_mit\\_Massenspektrometrie-Kopplung\\_GCMS.html](http://www.skz.de/de/forschung/technischeausstattung1/pruefverfahren/spektroskopie/4498.Gaschromatographie_mit_Massenspektrometrie-Kopplung_GCMS.html)

URL 8: Bundesamt für Naturschutz, Thomas Schneider, Rudolf May; *Verbreitungskarten der Farn- und Blütopengewächse Deutschlands* (01.08.2016)

URL: <http://floraweb.de/webkarten/karte.html?taxnr=3810>

URL 9: Bundesamt für Naturschutz, Thomas Schneider, Rudolf May; *Verbreitungskarten der Farn- und Blütopengewächse Deutschlands* (15.07.2016)

URL: <http://floraweb.de/webkarten/karte.html?taxnr=2098>



## Anlagen

Positionspapier Sybille Engel..... A-I

Fotos ..... A-III

# Positionspapier Sybille Eingel

**Staatliches Amt  
für Landwirtschaft und Umwelt  
Mecklenburgische Seenplatte**



StALU Mecklenburgische Seenplatte  
Neustrelitzer Str. 120, 17033 Neubrandenburg

Umweltforschungszentrum GmbH – UFZ  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig

Telefon: 0395 380 69440  
Telefax: 0395 380 69-160  
E-Mail: [sibylle.eingel@stalums.mv-regierung.de](mailto:sibylle.eingel@stalums.mv-regierung.de)

Bearbeitet von: Eingel  
Geschäftszeichen:  
(bitte bei Schriftverkehr angeben)

Neubrandenburg, den 28.04.2016

## Zuarbeit für die Biomassepotentialerhebung in Deutschland

Sehr geehrter Herr Marx,

für die Erhebung des Biomasseanfalls in Deutschland bei der Gewässerunterhaltung kann ich Ihnen folgende Information geben.

Zum besseren Verständnis der Zahlen einige Informationen die Sie wissen sollten.

Das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburgische Seenplatte ist u.a. zuständig für die Unterhaltung der Gewässer I. Ordnung im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte.

D.h. von 261 km Gewässerlänge werden ca. 164 km gekrautet mit unterschiedlichen Technologien (Mähkorb, Handarbeit oder Mähboot). Da die Gewässer unterschiedliche Sohlbreiten und Böschungslängen aufweisen, habe ich die Quadratmeter zusammengefasst.

Sohlkrautung	2.923.356 m <sup>2</sup>
Böschungsfläche	872.818 m <sup>2</sup>

Krautmenge gesamt 1.247,35 t (Trockensubstanz)

Gesamtkosten 614.775 €

Ich habe jetzt in den Zahlen nicht unterschieden zwischen einer und 2maliger Mahd, die Zahlen beinhalten den Gesamtanfall 2015. Auf Grund der örtlichen Gegebenheiten erfolgt eine einmalige oder mehrmalige Mahd. In der Böschungsfläche ist ebenfalls die gesamt gemähte Böschung erfasst, d.h aber nicht

das die Gewässer beidseitig komplett gemäht werden. Die Biomasse wird entsprechend BioAbfallVO landwirtschaftlich entsorgt (kostengünstige Variante) oder kompostiert. Bei der landwirtschaftlichen Verwertung wird die Biomasse in der Bilanz der Landwirte berücksichtigt.

Mit freundlichen Grüßen



Bodo Heise  
Abteilungsleiter

Anlagen

## Fotos



Abbildung 17: Transporteimer mit frischem Pflanzenmaterial von *M. heterophyllum*

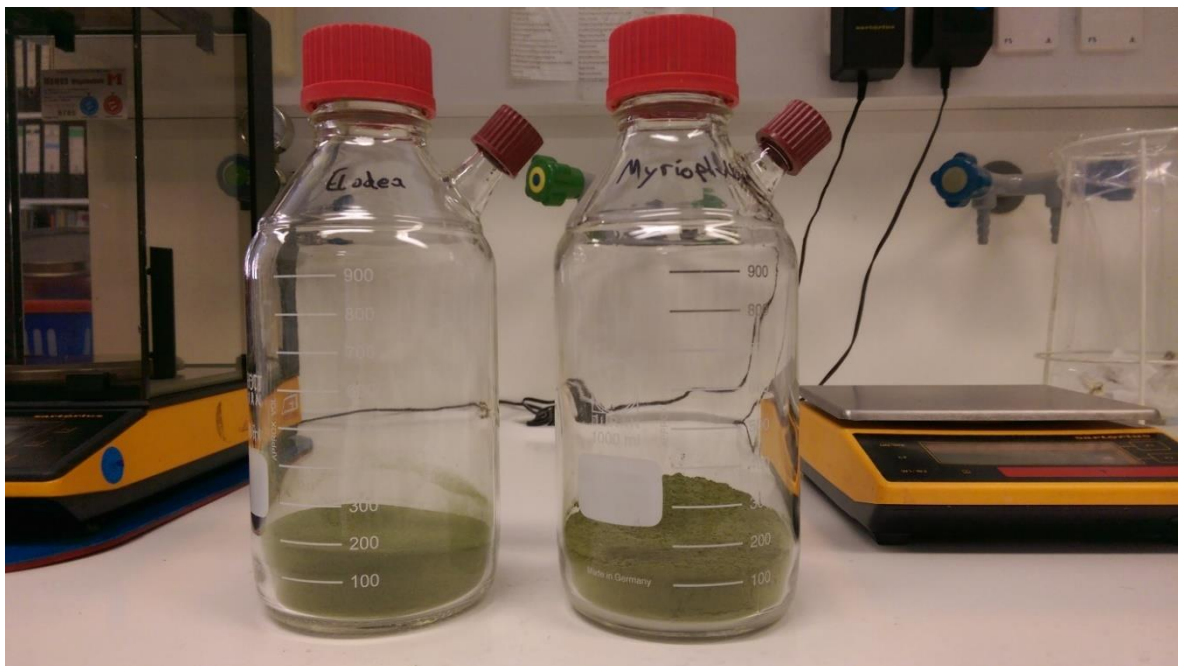


Abbildung 18: gemahlenes Pflanzenmaterial von *E. nuttallii* (links) und *M. heterophyllum* (rechts) in Begasungsflaschen





Abbildung 19: Pflanzenextrakt nach 24-stündiger Inkubationszeit im Überkopfschüttler



Abbildung 20: Filtration der Pflanzenextrakte von *E. nuttallii* und *M. heterophyllum*



Abbildung 21: Filtration von *Elodea nuttallii*



Abbildung 22: Filtration von *Myriophyllum heterophyllum*





Abbildung 23: genutzte Filterpapiere bei der Filtration von *Elodea nuttallii*



Abbildung 24: genutzte Filterpapiere bei der Filtration von *Myriophyllum heterophyllum*

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 22. August 2016

Lukas Marx